

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2026.07.003

燃气泄漏机器狗高灵敏度检测装备集成研究

谢国勇, 郭 丹, 赵光勇, 刘昱岑, 谭 芳

四川华油集团有限责任公司

摘 要: 在复杂多变的城市燃气应用环境中, 传统检测手段在灵敏度、移动性与实时性方面存在明显不足, 制约了精细化巡检的需求。因此, 研究围绕燃气泄漏检测任务, 对高灵敏度检测装备的选型与集成需求进行分析, 构建了以机器狗为平台的集成系统架构, 完成了结构、电源、控制与通信等方面的模块化设计与实现, 有效提升了装备在实际环境中的部署能力与检测性能。

关键词: 燃气泄漏; 机器狗; 高灵敏度检测; 装备集成

Research on Integration of High-Sensitivity Detection Equipment for Gas Leakage Based on Robotic Dog

XIE Guoyong, GUO Dan, ZHAO Guangyong, LIU Yucen, TAN Fang

Sichuan Huayou Group Co., Ltd.

Abstract: In complex and variable urban gas application environments, traditional detection methods have obvious deficiencies in sensitivity, mobility, and real-time performance, which restricts the requirements for refined inspection. Therefore, focusing on the gas leakage detection task, this paper analyzed the selection and integration requirements of high-sensitivity detection equipment, constructed an integrated system architecture based on a robotic dog platform, and completed the modular design and implementation in terms of structure, power supply, control, and communication. This effectively improved the deployment capability and detection performance of the equipment in actual environments.

Keywords: gas leakage; robotic dog; high-sensitivity detection; equipment integration

随着城市化进程的推进, 许多城市的燃气管道已历经多年使用, 存在不同程度的老化问题。这些管道由于长期的运作和自然因素的侵蚀, 开始显露出脆化、龟裂等迹象, 增加了燃气泄漏的风险。传统的人工巡检方式在执行过程中存在效率低、覆盖面有限、灵敏度不足等明显短板, 尤其对于复杂环境中存在的微量泄漏, 人工检测的准确性和实时性往往无法满足精细化巡检需求。随着机器人技术的飞速发展, 具备环境感知与自主移动能力的机器人巡检逐渐成为解决这一问题的有效方案。机器狗作为新兴的智能机器人, 能够在狭窄、复杂的环境中自主导航, 具备更高的巡检灵敏度与实时响应能力, 展现出在燃气泄漏检测中的巨大应用潜力, 尤

其在执行高风险任务时, 能够代替人工完成危险区域的全面检测, 提高巡检效率与精度, 显著降低事故发生的风险。

1 高灵敏度燃气检测装备选型与集成需求

1.1 燃气泄漏检测场景与装备性能需求

城市燃气管网泄漏事故常发生在复杂区域, 如地下管廊、设备密集的工业场所及埋地管道等, 这些区域的燃气泄漏通常浓度低、分布不均、易扩散, 人工巡检难以实现连续覆盖和实时响应, 特别是对埋地管道的检测更是困难。因此, 这项任务需要具备高机动性和高精度检测能力的智能平台来完

[第一作者简介] 谢国勇, 工程师, 从事城镇燃气相关工作。

成。机器狗作为具备地形适应、自主导航和动态避障功能的移动载体，能够进入狭窄、高风险区域执行自主巡检，适应地下通道及设备密集区等复杂环境。为了实现对微量泄漏的准确检测，集成的检测装备需具备低浓度气体灵敏度，能够在ppm级别范围内稳定响应，并在温湿波动下保持精准输出。此外，装备设计需满足机器狗的负载要求，确保轻量化、小型化，并且与机器狗本体的电气和控制系统兼容，确保高效集成与稳定运行。

1.2 高灵敏度检测装备类型与适配性分析

燃气泄漏检测任务对灵敏度、体积、功耗、环境适应性提出了严格要求，在选型过程中必须优先考虑设备能否在机器狗平台结构、电源和控制系统中实现标准化集成，常用检测原理包括非分散红外、可调谐激光吸收光谱、电化学检测与微型半导体敏感材料等类型。在具体选型中，应满足针对甲烷等常见可燃气在爆炸下限（LEL）10%以内的检测需求，传感器需具备至少 $\pm 2\text{ppm}$ 的分辨率与不高于10s的响应时间，确保在设备行进中仍能及时采样与分析；在物理结构上，应优先选择重量小于500g、三维尺寸小于 $80\text{mm} \times 80\text{mm} \times 60\text{mm}$ 的模块化设备，避免对机器狗稳定性和运动性能造成负面影响。同时，电源接口需兼容12V或24V直流供电系统，信号输出方式优先选用串口、CAN或TTL等与嵌入式控制器高度匹配的标准通信格式。此外，在环境适应性方面，应选择具备宽温运行能力（ -20°C 至 60°C ）、防尘防水等级不低于IP54的设备。

2 机器狗高灵敏度检测装备的集成实现

2.1 检测装备系统组成与功能模块划分

基于燃气泄漏检测在复杂空间中对高灵敏度、快速响应与智能协同的需求，为实现与机器狗平台的高效集成，高灵敏度检测装备需构建面向任务执行的系统结构，该结构通常由5个功能模块组成，包括气体检测模块、信号处理模块、供电模块、控制交互模块与通信反馈模块。气体检测模块作为核心感知单元，集成选型后的高灵敏度传感器组件，如基于非分散红外或激光吸收原理的甲烷检测传感器，采用开放式取样结构提升空气交换效率，

模块需具备浓度分布微弱梯度响应能力并在运行中保持 $\leq \pm 2\text{ppm}$ 的重复精度；信号处理模块主要负责对原始传感信号进行滤波、放大与数字化编码，其架构需适配嵌入式控制器平台，如基于STM32或ESP32等芯片组进行实时数据流采集并执行阈值识别与数据压缩，预处理后信号作为任务控制输入流接入主控系统；供电模块应设计为独立稳压电路或共享供电方案，支持12V或24V直流输入，集成过流保护与电磁屏蔽结构，以消除电机启动、电源切换等过程中的干扰脉冲，保障检测系统持续稳定供电；如图1所示，检测装备系统由5个主要功能模块组成，确保了各模块之间的高效协同与稳定运行。

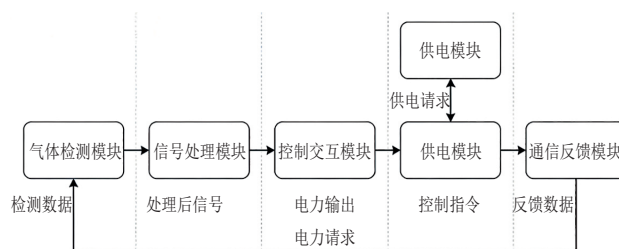


图1 检测装备系统模块架构图

控制交互模块需完成检测系统与机器狗主控之间的指令协调、任务触发与状态监控，要求支持TTL电平或CAN总线协议并内置异常状态码定义接口，实现动作链响应闭环；通信反馈模块承担数据链路上与远程信号交互任务，在对接任务指令系统或巡检平台时，需配置双通道输出机制，既向本体上传检测浓度及报警状态数据，又能同步定位信息和任务标识，其中传输链路选用低功耗广域通信（LoRa）或中距离高速通信（Wi-Fi 6）等协议，并具备缓存与断点续传机制^[1-2]。

2.2 检测模块与机器狗本体结构的集成设计

为实现高灵敏度燃气检测模块在机器狗平台上的结构集成，应依据机器狗机体结构特征、气体泄漏分布高度与动态行进姿态，选定合理的安装位置、布局结构与装配方式，确保传感器有效采样、不受运动干扰、便于维护更换且不影响平台本体功能运行。

具体而言，传感器建议安装于机器狗前胸下方框架区域，该位置距地高度约10cm~20cm，能够有效贴近地面积聚的低密度可燃气体泄漏区域，同时不干扰前方摄像头与导航激光模块的工作。该设

计,首先考虑了气体泄漏通常在接近地面处聚集,特别是较重的可燃气体,将传感器安装位置能够最大化提高气体检测的灵敏度。其次,为适应机器狗在充电或趴下时的状态,传感器避开了底部,选择安装在前胸下方的适当位置。此外,考虑到机器狗的动态行为,该安装位置不会干扰机器狗的运动和姿态,确保机器狗在各种状态下都能稳定运行。结构上,传感器安装区域设有横向连接槽与标准安装孔位,用于加装传感器支架。支架通过M4标准螺纹与主梁连接固定,确保传感器在移动过程中稳定运行。

传感器本体封装模块采用铝合金CNC一体壳体,尺寸控制在 $75\text{mm} \times 60\text{mm} \times 45\text{mm}$ 以内,壳体表面阳极氧化处理,内嵌高密度EPDM减震垫与不锈钢内嵌支架,支架与机器狗腹部主梁之间通过两点刚性连接加一端柔性连接构成三点安装体系,以有效缓解行进中的冲击载荷传递至检测单元。传感器采样窗口设置于壳体底部,开口朝下,窗口直径为 16mm ,边缘加装PTFE滤膜与防护网,保证气体自由扩散进入传感器腔体的同时有效阻隔粉尘颗粒与飞溅液体,同时窗口位置距地最小间距控制在 10mm 以上,以避免在不平整地面触底^[3]。为保障空气流通路径不被机器狗运动部件干扰,模块两侧预留气流辅助导流槽,槽宽 5mm ,高 15mm ,通向采样室两侧导气通道,最大程度提升微量泄漏采样的流体效率。

在布线设计方面,检测模块通过3芯屏蔽线缆连接主控板UART接口,布线自模块后部走线槽进入腹部主腔体,固定点设置3个,线缆接口均加装硅胶环密封,防止运动中因晃动拉拽产生脱落。整体安装完成后,检测模块重心低于整机重心 50mm 以内,不破坏姿态平衡,同时各结构件保持 10mm 以上间隙以避免机械干涉(如图2)。

2.3 能源系统与检测设备的统一供电设计

为实现检测装备与机器狗平台在电气系统层面的统一供电与稳定运行,需基于传感器电气特性、平台供电能力及整机能耗平衡进行详细设计,确保供电系统在长期巡检任务中具备高可靠性、高抗扰性与低维护需求。具体而言,机器狗主电源系统一般由 14.8V 或 24V 锂电池组组成,经主控电源模块稳压输出至各个子系统,而检测模块需接入该



图2 检测模块与机器狗本体结构集成设计示意图

供电体系,实现主电共享以减少附加电源模块所带来的体积和重量负担。其中,高灵敏度检测模块的供电需求集中于 5V 或 3.3V 直流低压区间,峰值工作电流不超过 250mA ,静态功耗小于 0.8W ,推荐采用主电源分支降压供电模式,即由主电源输出经降压模块(如LM2596 DC-DC转换器)转换至稳定 5V ,并设置独立保险丝与过流保护电路,防止传感器短路或波动对主控系统产生反向冲击。

模块内部采用多级滤波机制,包括 π 型电源滤波器与TVS瞬态抑制二极管组合,电源输入端使用铁氧体磁环进行EMI抑制处理,避免地面接触静电或电机电刷火花产生的高频干扰影响传感器工作稳定性。连接接口统一采用JST PH2.0标准插头,插拔寿命大于500次,具备反接保护与扣锁结构,而连接线缆采用3芯 0.2mm^2 双层屏蔽线,由电源仓后端出线进入检测模块壳体,线缆全程穿设热缩护套并经柔性固定夹点支撑以防行走晃动造成机械应力集中。此外,检测系统供电线路需通过机器狗主控板进行电压实时检测与温升监控,若电压低于设定门限(如 4.6V),系统将通过主控自动降低采样频率进入低功耗模式,降低功耗冲击,延长续航时间。对于持续任务时间超过 2h 的应用场景,可配置独立备用供电模块,采用 7.4V 聚合物锂电池并联接入,设置肖特基二极管用于自动切换供电路径,保障检测系统在主电异常状态下不间断运行(如图3)。

2.4 控制系统与检测逻辑的嵌入式融合实现

为实现检测系统与机器狗平台之间的任务级联动,需将高灵敏度燃气检测模块的信号处理逻辑、状态反馈机制与动作控制策略嵌入主控系统的嵌入式框架中,构建统一的指令识别、响应调度与

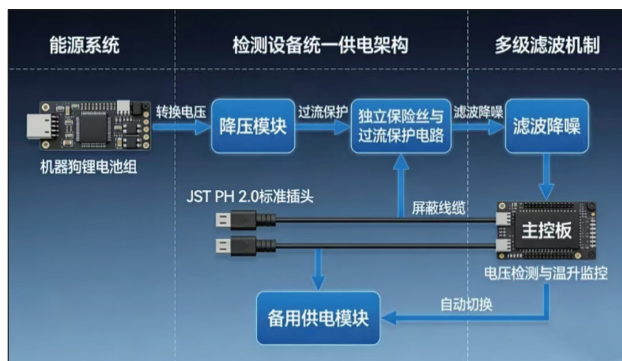


图3 能源系统与检测设备的统一供电设计

执行反馈流程。在控制系统架构方面，检测模块内部信号处理单元完成原始气体浓度采样、数据滤波与预判逻辑运算后，通过串口通信（UART）周期性输出一组格式化数据帧，数据帧结构包括起始位、浓度值、状态位、时间戳与校验位，统一采用9 600bps速率、8N1格式发送。

其中，主控系统基于STM32或ROS主机，在系统初始化阶段开启串口监听线程，建立检测数据接收回调机制，并将接收到的检测浓度值与预设阈值进行比较，若检测值持续超过安全阈值（如50ppm）或超过设定时间窗口（如3s），则触发一级报警状态，并根据系统联动逻辑执行一组预定义动作序列，包括立刻停止前进、发出声光警报、标记当前位置及暂停自主导航模块任务调度。此外，在动作指令触发机制中，主控控制层调用API函数接口封装命令格式，通过总线协议下发控制信号至电机驱动模块与执行器控制器，完成平台动作状态的实时切换。

接着，状态信息同步由事件回调线程完成，包括报警状态、浓度极值、系统时间及导航坐标，将以ROS Topic或标准Modbus通信协议发送至远程监控系统或上位机平台，保障检测事件可被远程系统实时接收与记录。为增强控制系统的实时性与可靠性，检测逻辑集成线程需具备独立运行优先级，设定数据帧丢失重发机制与采样数据缓存策略，在通信中断或丢包情况下维持最低功能运行，并在异常状态解除后自动恢复控制链逻辑。同时，在检测任务与移动控制协同运行过程中，主控系统需周期性轮询检测数据状态位，同时记录浓度变化趋势并进行位置标记与任务记录（如图4）。

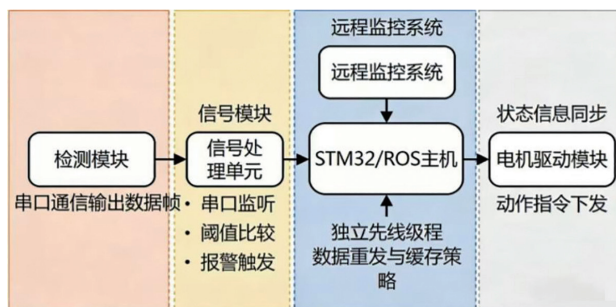


图4 控制系统与检测逻辑的嵌入式架构图

2.5 通信与反馈链路的系统集成

为实现高灵敏度燃气检测任务的信息闭环与远程监测能力，需将检测数据、报警状态与位置信息同步集成至通信链路中，构建一套稳定、低延迟、抗干扰的数据上传机制，使检测模块、机器狗控制系统与远程管理平台之间形成数据通路的可靠闭合。基于此，通信链路设计需满足3项核心要求：一是支持结构化数据格式的高速低误码传输；二是满足中长距离通信覆盖需求并兼顾功耗控制；三是具备通信异常下的数据缓存与断点续传能力。对此，系统采用双通信通道结构，主通道为Wi-Fi 6模块，搭载于机器狗后部通信支架，作为高带宽短距传输路径用于实时图像、浓度变化曲线与设备运行状态的持续回传，辅通道选用LoRa 433MHz模块，作为低带宽长距通信链路，用于报警信息、任务坐标与关键浓度阈值事件的冗余发送，以保障在网络受限场景下的基本信息同步。

数据结构统一采用TLV格式封装，其中T为数据类型标识，L为数据长度字段，V为具体值域内容，包括当前气体浓度、检测状态标志位、设备时间戳、机器狗位置坐标（基于SLAM或GPS）与设备唯一ID码，每个数据帧附加CRC16校验位，保证数据在复杂电磁环境下的传输完整性。此外，通信模块集成于主控系统内部，由中断服务程序驱动，结合环形缓冲区实现异步发送与接收，并设有数据缓存池，当链路发生中断超过3s时，系统自动进入缓冲模式，将关键数据存储于本地EEPROM区域，最多支持500条记录缓存，恢复通信后按时间顺序依次补发。同时，通信模块支持与上位机平台建立MQTT协议连接，检测终端作为客户端周期性上报状态消息至Topic端点，平台根据预设策略实现对

异常状态的推送、事件存档与远程调度指令下发。

这一过程中,通信模组电源由主供电回路分压供电,内嵌独立LDO稳压芯片与过压保护电路,确保通信功能在电压波动环境下稳定运行,而天线部分与外壳间采用SMA接口软连接,避开干扰源区块安装于机器狗背部高位,最大化信号覆盖角度(如图5)。

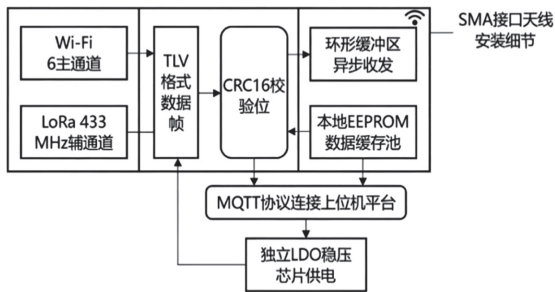


图5 通信与反馈链路的系统集成架构图

3 集成系统测试与运行性能评估

3.1 模拟环境下的集成系统试验设计

为全面验证所设计的机器狗高灵敏度燃气检测装备的集成可行性与运行稳定性,需在可控试验环境中构建典型应用场景并对结构适应性、数据交互完整性、实时反应能力及通信可靠性等关键指标进行系统性测试。试验环境基于封闭式气体泄漏模拟平台构建,平台尺寸为 $12\text{m} \times 5\text{m} \times 3\text{m}$,内部设有不同结构类型障碍区域,包括直角转角、斜坡通道、低矮空间与分层格栅,地面设有3个气体释放点,分别模拟轻微泄漏(5ppm)、中度泄漏(30ppm)与严重泄漏(75ppm)3种工况。

泄漏气体采用标准工业用甲烷气源,释放速率由质量流量控制器设定。实验中,机器狗平台搭载集成后的检测装备,在无外部导航辅助的情况下执行全自主路径巡检任务,任务路径依托视觉与惯导融合SLAM构建地图,自主绕障与决策路径生成,系统在运行过程中以每秒一次频率采集气体浓度值并与平台位置数据绑定上传,同时记录检测响应延迟、模块供电电压波动、姿态控制偏差与数据回传延时等关键参数。测试任务每组执行时间为15min,重复运行5次以排除偶然误差,系统运行状态由上位机平台统一采集,所有数据用于支持后续

性能评估指标统计与灵敏度验证分析。

3.2 检测能力验证与灵敏度测试结果

基于构建的模拟试验场景及测试流程,对检测装备在动态环境下的实时响应能力、浓度识别准确性与系统整体运行稳定性进行了统计分析 with 性能评估。测试指标包括目标气体检测灵敏度、响应时间、信号漂移、误报率与数据传输丢包率等。所有数据经标准统计方法处理后整理如下表1所示。

表1 实验数据处理结果

指标名称	实测平均值	标准要求范围	是否满足要求
检测灵敏度(ppm)	2.1	≤ 3	是
响应时间(s)	2.8	≤ 5	是
信号零漂(ppm)	± 0.6	$\leq \pm 1.0$	是
误报率(%)	1.2	≤ 2.0	是
丢包率(%)	0.4	≤ 1.0	是

测试结果表明,在5ppm、30ppm与75ppm 3种浓度条件下,检测模块均能够在不高于3s的延迟范围内识别出浓度突变并准确输出警报信号。

4 结论

本文研究了城市燃气泄漏场景中高灵敏度检测与机动化平台的集成需求,完成了检测装备的选型分析和与机器狗平台的集成设计。通过模块化设计,提升了系统的稳定性和可靠性,确保了电源管理、数据处理和通信反馈的高效协同。实验表明,集成方案在检测灵敏度、响应速度、功耗控制和通信稳定性等方面表现良好,能够适应复杂环境下的燃气泄漏检测任务,并确保数据的实时回传。该系统为城市燃气智能巡检提供了技术支持,并为提升巡检精度、效率 and 安全性提供了可行方案,具备广泛的应用潜力。

参考文献

- [1]姚勇,韩晓明.城市埋地燃气管道泄漏原因及检测技术探析[J].标准生活,2025,(08):284-286.
- [2]赵勇兵.燃气管道泄漏声波检测与定位技术研究[J].石化技术,2025,32(11):237-238+55.
- [3]陆王强.城市燃气管道泄漏检测与定位技术研究[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(18):51-54.