

第二届“汇川杯”全国智能自动化创新大赛

油检先锋

-基于PID技术的油气管道检测机器人-

inovance022334

火箭军工程大学

冲一保二稳三组

目 录

第一章 项目背景	3
1.1 项目背景	3
1.2 项目简介	3
1.3 项目意义	4
第二章 市场分析	5
2.1 环境分析	5
2.1.1 政策与监管环境	5
2.1.2 地理与自然环境	5
2.1.3 技术与市场环境	6
第三章 设计要点	8
3.1 设计特点	8
3.1.1 设计需求	8
3.1.2 设计选择	8
3.2 设计模块	9
3.2.1 物理驱动模块	9
3.2.2 自适应姿态配合模块	9
3.2.3 环境感知检测模块	10
3.2.4 人机交互显示系统	10
第四章 工作原理	11
4.1 工作流程	11
4.2 具体实现	12
4.2.1 三维结构实现	12
4.2.2 电子电路实现	12
4.2.3 感知与探测功能实现	12
4.2.4 人机交互功能实现	13
第五章 项目创新	14
5.1 全方位观测与全封闭保护设计	14
5.2 三轴主动稳定与模块化增强系统	14
5.3 四电机驱动与精准控制	14
5.4 低频通信技术与线缆通信技术	14
5.5 通信稳定性	14
第六章 应用前景	15

第一章 项目背景

1.1 项目背景

近年来，随着我国经济高速发展与工业化进程加速，社会对能源的需求呈现跨越式增长。作为全球最大能源消耗国之一，我国高度重视能源运输管道体系建设，出台了《石油天然气管道保护条例》《油气输送管道完整性管理规范》等政策，明确要求构建能源运输全生命周期监测体系。而油气资源作为支撑工业生产和民生保障的核心基础能源，其发展运输直接关系到区域经济发展、生态环境保护和国家战略安全。目前，我国持续推进“西气东输”“中俄油气管道”等一批国家重点工程落地，油气管道总里程已经突破 18 万公里，形成了覆盖东西部、贯穿海陆的复杂管网体系。

然而，随着油气运输规模的持续扩大与管道服役年限的增加，行业面临着多重严峻挑战。一方面，管道网络日益复杂化，从穿越山地、河流、冻土等特殊地质区段，到途径人口密集区、生态保护区等敏感区域，管道周边环境的多样性大幅增加了运行风险；另一方面，早期铺设的管道已普遍进入“老龄化”阶段，腐蚀、焊缝缺陷、第三方施工破坏等问题频发。据团队调研了解，目前传统人工巡检与单一检测手段已经难以满足长距离、多场景的实时监测需求。在此背景下，如何高效、精准地识别管道隐患并及时进行维修，保障油气能源安全，已经成为行业保障能源安全的核心命题。

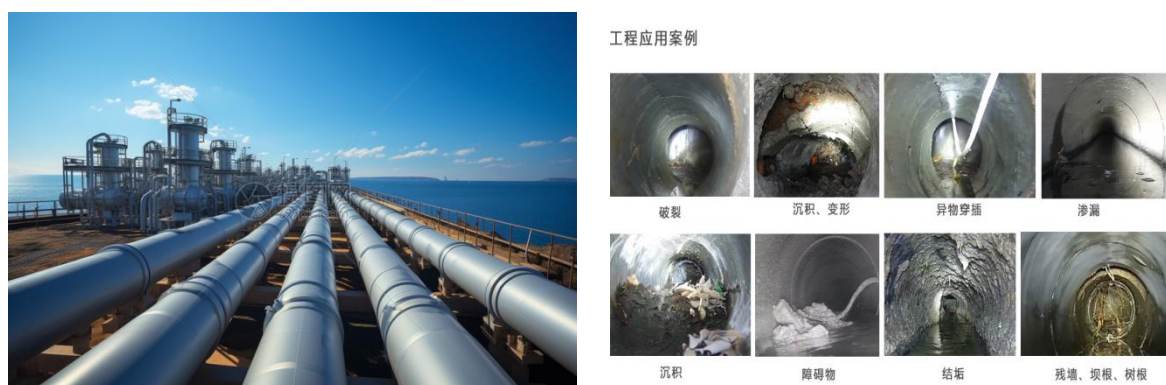


图 1-1 油气运输管道及常见异常情况

1.2 项目简介

本项目研发的自平衡球形机器人采用模块化集成设计，核心由外部球壳、驱动单元及检测单元三大功能模块构成，针对性解决油气管道复杂网络环境下的检测难题。

外部球壳采用圆形结构，贴合圆柱形管道内壁曲面特性，在减少运动摩擦阻力的同时，通过对称外壳提升抗冲击能力。驱动单元以“零半径转向”为核心设计目标，搭载四无刷电机、涵道推进器管道和两个驱动轮，通过PID控制算法动态调节电机输出力矩，实现机器人在直管道的高速运动和弯管道的灵活转向。检测单元集成装配高清摄像头、热成像温度传感器和四合一传感器，分别用于识别管道表面损伤（如裂纹、锈蚀），快速定位异常温度区域（如泄漏点热辐射），实时监测管道内氧气（O₂）、一氧化碳（CO）、硫化氢（H₂S）、二氧化硫（SO₂）等气体浓度。同时自主设计手持遥控终端，集成触控屏与操作按钮，可实现显示传感器数据、摄像机图像、控制机器人运动。

1.3 项目意义

管道机器人作为一种先进检测技术，凭借其高密封性和灵活性，能够替代人工在复杂、恶劣且难以到达的管道内开展作业。本项目搭载有高清摄像头，可以实时捕捉并回传管道内部的视频图像至遥控手柄，使操作人员清晰、直观地了解管道内部情况，便于及时、高效地根据实时画面迅速做出判断和决策。

针对油气长输送管道内常涉及的硫化氢（剧毒）、甲烷（易燃易爆）等危险气体泄漏场景，传统的人工检测需要作业人员穿戴重型防护设备进入密闭空间，存在着窒息、爆炸、中毒等多重风险。本项目搭载了热成像传感器和四合一气体传感器，可以深入管道内部，采集温度分布梯度和气体分布浓度等数据。通过这些数据，操作人员可以评估管道安全性、预判潜在风险以及制定针对性维修计划。

此外，管道机器人可以灵活搭载各类专业管道检修装置，如 3D 激光扫描仪、腐蚀速率检测仪等，用于满足对管道完整性评估、地质灾害预警等衍生需求，实现更高精度检测维修任务，拓展应用到不同领域管道检测中。例如，在冻土区管道检测中，可加装振动传感器与土壤水率探头，实现地质沉积与管道变形分析；在海底管道检测中，可拓展声呐成像模块实现水下管道缺陷识别。

综上所述，本项目不仅在一般油气管道检测维修领域中具有广泛应用前景和巨大发展潜力，而且可以延伸拓展到冻土管道检测、海底管道检测等领域。该管道机器人能够有效提高管道检测技术的智能化水平、降低运维难度、保障能源动脉安全，为油气管道运输行业做出有力贡献。

第二章 市场分析

2.1 环境分析

2.1.1 政策与监管环境

我国作为全球最大的能源消耗国之一，已构建起多层次的政策法规体系，全面强化对管道运输业的监督管理，确保能源输送系统安全稳定与高度可靠。

在检测规模层面，根据《油气输送管道完整性管理规范》强制性要求，高后果区管道需要每 3 年完成一次全检测，2025 年全国需检测里程目标超 8 万公里，这一刚性指标直接推动了检测需求的规模化释放，加速了管道检测行业向自动化、智能化转型的进程。

在技术应用层面，政策明确要求“优先采用机器人替代高危人工作业”，规定在硫化氢浓度超 20ppm 的管道中禁止人工进入检测，强制使用防爆型机器人。这一规定不仅源于对青岛原油管道爆炸等事故的深刻反思，更是通过高危场景人工作业禁令，倒逼管道检测技术升级迭代。在政策驱动下，行业正在加速实现机器人检测的全面普及。

一、加强管道建设时期高后果区的管理

管道建设时期辨识出的高后果区应作为优化路由的重要因素，管道无法避让高后果区时应采取加强管道本体安全的措施，试压及投产阶段应对处于高后果区管道重点检查，制定针对性预案，采取安全措施并做好管道沿线的宣传。

二、加强管道运行阶段高后果区的识别

管道企业应在管道运行阶段周期性的进行高后果区识别，识别间隔时间不得大于18个月，有条件的管道企业宜每年开展一次，当管道及周边环境发生变化时，及时进行高后果区更新。

管道企业应将高后果区内管道作为实施风险评价、完整性评价，风险削减与维修维护的重点管段。

三、建立健全高后果区的专项管理方案和档案

管道企业应当建立健全高后果区完善的专项管理方案和档案，档案的内容要包含《油气输送管道完整性管理规范》（GB32167—2015）中要求的管道信息、周边环境信息以及专业巡护人员信息。将高后果区档案同时向区级和市级油气管道保护部门备案登记，高后果区情况有变化时应重新备案登记。



图 2 现有政策法规

2.1.2 地理与自然环境

自然地理环境和季节性变化（如雨季、旱季、气温波动）对油气管道工程有显著影响。在雨季可能会存在山洪和滑坡风险，强降雨导致山体滑坡或者河流暴涨，导致管道挤压变形甚至弯曲断裂，例如在贵州晴隆 2017 年因暴雨导致中石油输气管道泄漏爆炸，造成 8 人死亡、35 人受伤；在旱季可能会因为风蚀加快管道损耗，或者导致坡体表面皸裂，松散土体在重力作用下崩塌撞击管道，例如在黄土高坡旱季崩塌体撞击管道导致形变案例占比高达 23%。

山东省青岛市“11·22”中石化东黄输油管道泄漏爆炸特别重大事故调查报告

Aa 字体: 小 | 中 | 大

关键词: 泥质泥页岩; 山区; 油气管道; 地质灾害; 稳定性; 防治对策

6

且其使用双电机驱动导致续航能力短，通常需要电缆供电，限制移动范围。因此，履带式机器人不适合在长距离、复杂管网、狭窄管道内作业。

蠕动式机器人模仿生物蠕动或蛇形结构，通过伸缩式关节实现柔性移动，适合在小管径、垂直管道、多弯头或嵌套管道等开展作业。然而，蠕动式机器人运动速度极慢，不适合在长距离检测中使用，同时受限于结构强度，难以搭载重型传感器。因此，蠕动式机器人不适合长距离、多障碍管道内作业。

外附着式机器人通过固定于管道外壁的传感器实时监测，适合在长输送管道连续监测，无需停机介入，能够在高风险领域代替人工巡检。然而，外附着式机器人的检测精度依赖于布点密度，如果部署稀疏可能会漏检微小缺陷。同时无法进行动态交互，仅能监测，无法像其他机器人那样进入管道内部进行近距离详查或修复引导。因此，外附着式不适合高精度，检测实时性高的管道作业。

表 1 管道机器人对比

机器类型	轮式车型 机器人	履带式 机器人	蠕动式 机器人	外附着式 机器人
移动 方式	轮子 滚动前进	履带在地面 滚动前进	身体蠕动或伸缩移 动	外部附着装置 在管道壁移动
适用 环境	平坦、无障 碍物管道	崎岖、不平整 有坡度的管道	狭窄、弯曲 或复杂管道	光滑、金属 或其他磁性材 料管道
移动速度	较快	中等	关节多影响速度	不移动
液体作业	无	无	有一定能力	无
跨障能力	差	中等	关节限制	无
适用尺寸	较大管道	多种尺寸	小型管道	不限管道尺寸
操作复杂	中等	中等	高（多关节控制）	固定位置操作
维护难度	中等	中等	关节多，易损坏	低（简单结构）

第三章 设计要点

3.1 设计特点

3.1.1 设计需求

(1) 高速运动与平稳性：机器人能够实现在管道内的快速巡检，具备可控调速能力，适应直管段加速与弯管段降速的工况切换。同时可以通过主动平衡算法维持机身的姿态，避免因颠簸或碰撞导致传感器采集数据失真。

(2) 多向行走与越障能力：机器人具有全向高自由度运动能力，支持垂直爬升、水平移动及小半径转向，适应 T 形管、U 形管等复杂结构。同时具有跨越常见管道内障碍物（沉积物凸起、焊接瘤）的能力。

(3) 硬件结构简单可靠：外壳选用防爆防腐蚀性的外壳材料，能够在一般油气管道内安全开展工作。为了便于后期维修，机器人的硬件结构应该尽可能简单可靠，并且具有一定的防冲击能力。

(4) 通信稳定性：在无中继器连通通信的条件下，在金属油气输送管道内的有效通信距离不小于 5 公里，在更长距离检测时采用电缆拖缆供电技术，并能够利用电缆回传数据。

(5) 检测数据准确性与全面性：要尽量覆盖管道检测所需要的数据，能够做到精准识别裂纹、锈蚀、局部过热、有毒气体等常见问题。

3.1.2 设计选择

(1) 物理结构

常见的机器人类型包括轮式、履带式、蠕动式和附着式。在综合权衡各类机器人的优缺点并结合项目设计需求后，我们最终选定了球形机器人结构。该结构优势在于：

- 1、其球体外形能够很好地适配圆柱形管道，通过紧贴管道内壁滚动实现运动。
- 2、我们开发的球体为 $330 \times 330\text{mm}$ ，经调研发现能够适应大部分管道尺寸。
- 3、缓冲性与密封防护性：其对称球体结构稳定性较好，能够有效缓冲坠落冲击。采用密封结构设计，可以有效防护内部元件。

(2) 驱动控制

机器人配备有四伺服电机驱动单元，并额外装配了双涵道推进器系统，其

- 1、核心驱动：四伺服电机通过精准地力矩控制，驱动球形本体进行滚动运动。对两个方向控制无刷电机施加差速，即可实现机器人的转向及在管道内的爬升或下降。
- 3、涵道推进辅助：双涵道推进器可以提供额外的推进力，主要用于增强在特定姿态下的运动能力或者克服复杂阻力环境（管内积液、大倾斜角管道等）。

3.2 设计模块

3.2.1 物理驱动模块

球形管道机器人的物理结构是其核心优势，使其能够紧贴圆柱形管道内壁移动，在管道内具有卓越的自适应能力和移动灵活性。通过对两驱动伺服电机转速的协同调节，精准控制机器人在管道内的移动速度，从而稳定实现其在管道内的爬升与下降。通过对左右两侧驱动伺服电机施加差速控制，机器人能够实现多方向移动和原地零半径转向。



图 4 物理结构设计

3.2.2 自适应姿态配合模块

为保持机器人在管道内的姿态稳定，采用了基于 PID 控制算法的三轴姿态平衡机制。其中俯仰与横滚控制是通过球体内部的伺服电机驱动配重块移动，结合 PID 算法的闭环控制，实时调整机器人的重心位置，以补偿姿态扰动。偏航控制是通过差速调节左右驱动轮的转速，改变作用于球体的旋转力矩，从而实现绕垂直轴方向的转动控制。机器人关键受力分析如下图所示。

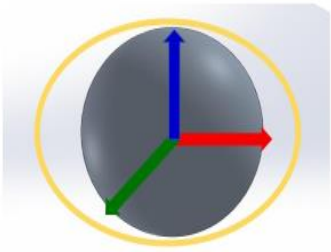


图 4-1 X、Y 轴方向

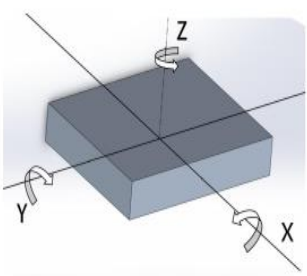


图 4-2 Z 轴方向

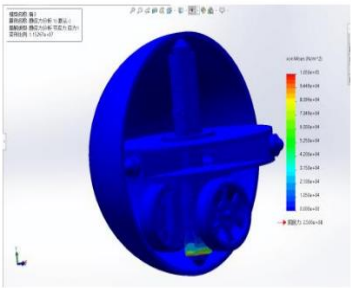


图 4-3 材料受力分析

图 5 自适应模块设计

3.2.3 环境感知监测模块

该模块整合了两个核心传感器单元——温度传感器和气体传感器。其中热成像温度传感器用于实时检测管道内部的温度分布及其变化，可精准识别温度异常区域（如局部温度过热或过冷），有效预防因管道温度异常所引发的设备故障或安全事故。四合一气体传感器实时监测管道内环境中四种关键气体的浓度，检测氧气浓度确保工作环境安全，检测一氧化碳浓度预防中毒风险，检测甲烷浓度探测易燃易爆气体泄漏，检测硫化氢浓度识别有毒有害气体泄漏。该传感器能够提前预警气体泄漏风险，为操作人员提供及时的安全信息，便于快速响应与处置安全隐患。

3.2.4 人机交互显示系统

团队自主设计了一款可视数媒屏，在屏幕上能够直接显示机器人搭载的摄像机捕获到的管道内部影像，同步展示管道内部的温度场分布热成像图，直观呈现所检测的四种气体的实时浓度数据，显示机器人电路的电流电压值。机器人同时具备过压/过流保护功能，当检测到电压或电流超出预设安全阈值时，支持远程指令强制切断机器人电源，保障设备安全。数媒屏配套设计了四个摇杆，分别用于控制前后滚动，左右旋转，云台俯、仰角度调整等。

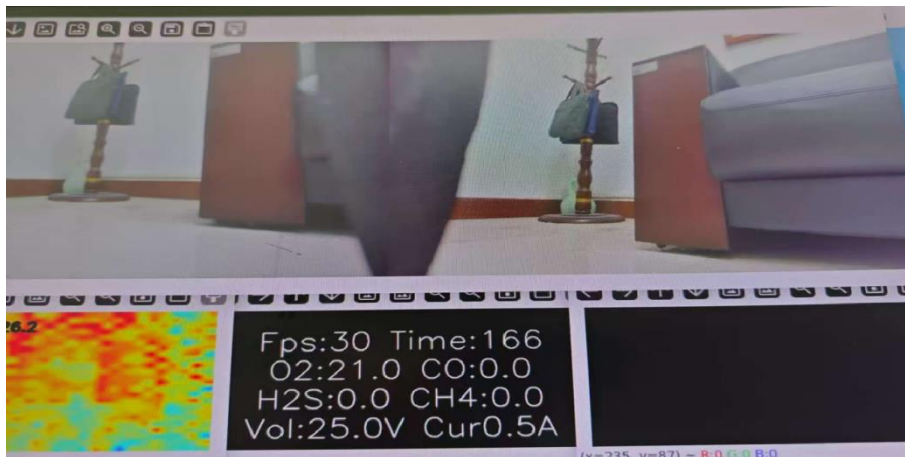


图 6 可视化数据界面

第四章 工作原理

4.1 工作流程

操作人员操作：操作人员启动机器人电源，建立机器人与控制终端的双向通信链路，在验证通信传输稳定性及传感器初始化状态后，远程操控机器人进入目标管道检测区域。

驱动模块工作：机器人依靠四伺服电机驱动核心，产生前进/后退动力，融合涵道推进器作为辅助动力源，实现旋转、滚进和冲跃等复杂动作。操作人员根据管道情况进行具体运动操作。

检测模块工作：机器人配备温度传感器和四合一气体检测器，传感器在开机后自动运行，实时采集管道内部的相关数据，如温度、气体浓度等。传感器数据通过低频无线通信或线缆连接传输回控制终端，并直观显示在数媒屏上。

操作人员响应：操作人员持续监控数媒屏上显示的各项环境参数与机器人状态信息。一旦系统检测到或操作员判断到环境异常信号，操作员立即采取预定义响应措施，如停止检测、撤离人员或启动紧急预案等，以确保人员、设备安全。

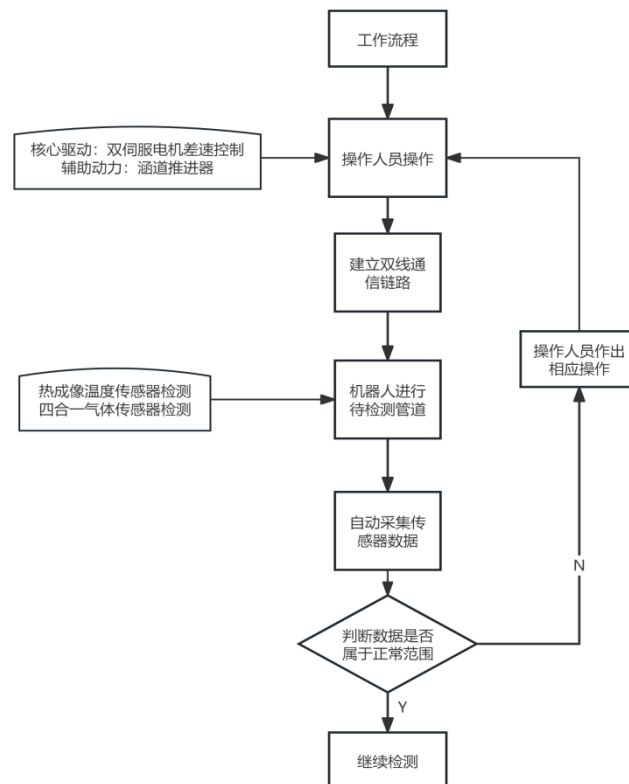


图 7 工作流程

4.2 具体实现

4.2.1 三维结构实现

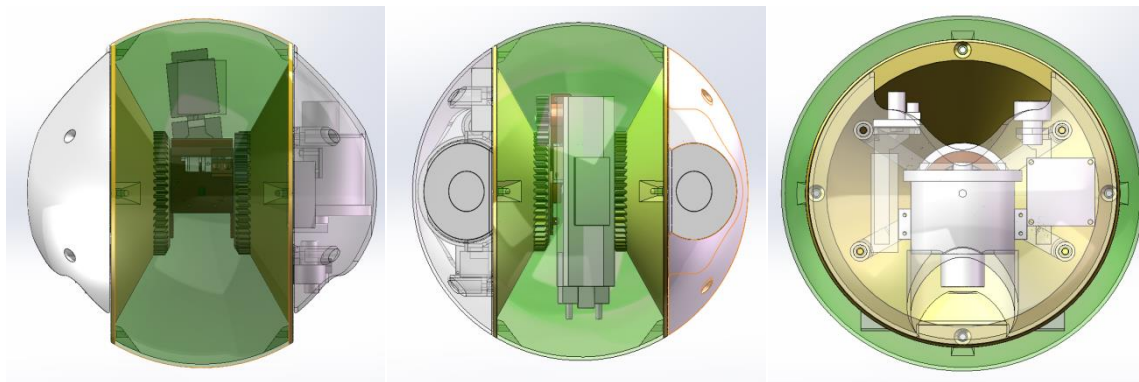


图 8 三维结构图

4.2.2 电子电路实现

我们选用 STM32H750 作为主控芯片，相较于常见的 STM32F4，它有着显著的性能优势。STM32H750 采用了更先进的工艺和架构，主频更高，数据处理能力更强，能够快速处理大量传感器数据和复杂的控制算法，确保机器人在各种复杂工况下都能做出迅速、准确的响应。为了确保机器人的安全运行，我们设置了保险丝。当机器人运行过程中出现电流过大、温度过高的情况时，保险丝会自动烧断，使机器人停止运行，从而避免因电气故障引发火灾等严重后果，为机器人提供了可靠的安全保障。涵道推进器是机器人在管道中行进的重要动力装置。当机器人在管道中遇到石子等障碍物时，涵道推进器能够产生强大的推力，将障碍物冲撞开，使机器人顺利通过，大大提高了机器人的越障能力和在复杂管道环境中的适应性。

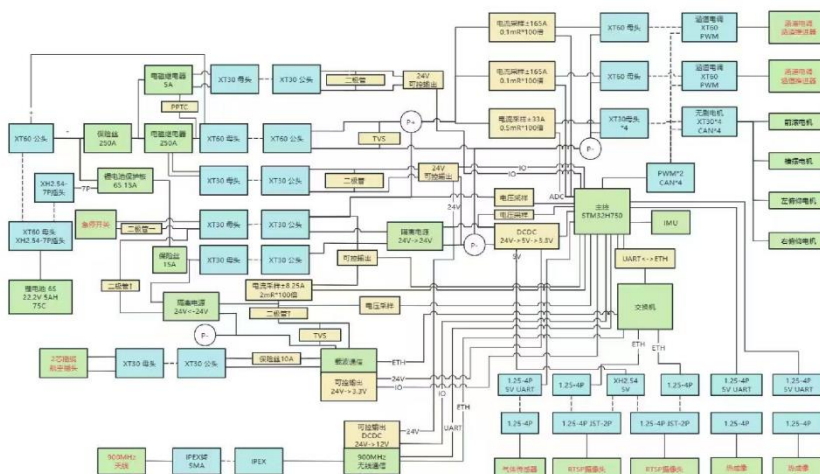


图 9 电子电路图

4.2.3 感知与探测功能实现

感知模块由两个高清摄像头、热成像温度传感器和四合一气体传感器构成，摄像头给操作人员提供清晰的管道内部视野，气体传感器可以检测管道内部的气体环境，可以检测氧气、一氧化碳、甲烷、硫化氢等气体的浓度。我们采用 mlx90640 远红外热传感器阵列，该传感器具有 55 度视角，能够在更远距离精确检测特定区域和温度范围内的目标物体。其尺寸小巧的特点，方便集成到机器人中。

4.2.4 人机交互功能实现

我们为机器人配备的遥控器操作便捷，左下摇杆用于控制机器人重心前后移动，右下摇杆控制重心左右移动，右上摇杆控制推进器云台俯仰，左上摇杆控制推进器油门，往上推动可同时增加左右推进器油门，左右推动则控制左右推进器油门差。同时，搭配可触屏树莓屏，操作人员可以直观地查看机器人的运行状态、检测数据等信息，实现更精准地控制和操作。

第五章 项目创新

5.1 全方位观测与全封闭保护设计

设计了全封闭式可视球壳，该球壳不仅提供了 360 度无死角的观测视野，还能有效隔绝外界液体腐蚀，保护内部精密系统，确保机器人在各种恶劣管道环境中的稳定运行。球形设计优化了管道内的运动性能，实现了零半径转弯，增强了作业的灵活性。

5.2 三轴主动稳定与模块化增强系统

三轴稳定系统配合 PID 算法实现闭环控制，调整配重和轮速以保持机器人稳定。模块化设计使摄像头等元件独立，带有独立电源，提升了信号接收和传感器搭载能力，增强了机器人的适应性和功能性。

5.3 四电机驱动与精准控制

四电机传动系统配合操纵杆，实现灵活的正反转和精准转弯。三轴稳定系统与 PID 算法确保机器人在水陆环境稳定运行，软启动功能减少启动晃动，提升操作稳定性。模块化传感器增强数据采集，支持精准反馈和决策。

5.4 低频通信技术与线缆通信技术

使用低频远距离的无线通信技术，确保在长距离的管道检测过程中，与控制端保持稳定的通信连接，减少地形、障碍物等因素的干扰。同时结合电力线载波的拖缆通信技术，实现机器人在工作过程中同时充电和使用，有效解决了续航问题，确保检测作业的连续性。

5.5 通信稳定性

机器人的天线通过特殊设计，能够保持一定角度，确保天线在机器人运动过程中不会直接撞击到地面，有效避免了天线损伤，保障了无线通信的稳定，确保机器人与控制端之间的通信不受干扰。

第六章 应用前景

在城市地下管道的检测与维护工作中，地下管道机器人正扮演着不可替代的核心角色。它们不仅能实时监测石化工业生产流程中易燃、易爆物料的泄漏风险，更能精准排查石油、天然气等能源输送过程中的潜在安全隐患，为城市地下管道系统的安全稳定运行筑牢防护屏障。

作为缓解能源紧缺的关键支撑，石化能源在当今社会依然不可或缺，它是我国工农业生产多个核心环节赖以运转的基础性能源。长输管道作为油气资源最主要的运输方式之一，与铁路、水运、公路、航空共同构成五大运输体系。凭借高效、安全、环保的显著优势，长输管道在全球范围内快速发展，已形成规模化的管网输送网络。但随着服役时间延长和外部环境变化，管道内部结构与功能不断劣化，给安全运行带来了严峻挑战。

这一难题的破解，离不开地下管道机器人的技术支撑。它们可搭载多样化作业负载：红外线测距仪、高清摄像装置及光电传感器能实时回传管道内部影像与数据，确保检测结果精准全面；封堵装置则可对故障点实施即时封堵。同时，平衡装置与柔性结构的创新设计，让机器人在不同弧度的管道中都能保持稳定姿态，有效避免侧翻，显著提升了越障能力与场景适应性。

地下管道机器人在管道检测作业中作用尤为突出。它们能全面掌握管道内部结构状态，开展结构性与功能性双重检测，为管道安全保驾护航。比如在工程验收阶段，机器人可完成全维度检测，确保管道符合规范标准；在城市规划环节，其提供的精准数据能辅助规划者科学布局地下管网系统。

未来，地下管道机器人的应用前景将更为广阔。它们将深度覆盖城市供水、排水、燃气、热力等民生管道领域，在工业管道的安全监测与故障诊断中也将发挥更大作用。随着技术持续创新，机器人的性能与功能将不断升级，为城市地下管道系统的安全运行提供更强劲的技术保障。