

参赛学生姓名：王慕洲

中学：中国人民大学附属中学

省份：北京市

国家/地区：中国

指导老师姓名：邵珠峰

指导老师单位：清华大学

指导老师姓名：王艺平

指导老师单位：中国人民大学附属中学

论文题目：燃气管道内检测机器人设计及感驱控研究

论文题目：燃气管道内检测机器人设计及感驱控研究

作者：王慕洲

## 论文摘要

在迅速发展的现代社会中，城镇燃气管网的规模不断扩大。然而，其检测维修工作缺乏高自动化水平的设施，目前大多依靠人工巡检，容易发生漏检等失误，并且效率较低，难以对管道内部情况进行精细监测并获取相关数据。此外，由于地下管道环境复杂，人员在封闭空间内作业存在较大的安全隐患。为了解决上述问题，本研究设计出了一款高自动化的燃气管道内检测机器人。本文围绕该款检测机器人的机械结构、电气系统、手动控制系统、基于计算机视觉的自动控制系统等方面介绍其设计方案与运行原理，致力于打造通过性强、自主性高、稳定性高的燃气管道内检测机器人。随后按照上述三项标准对其工作性能展开研究，通过实验数据证实了其性能良好。

首先，本文提出了一种单节轮式燃气管道内检测机器人的机械设计方案，适合内直径为 150mm 的燃气管道内的检测任务。轻量化设计降低了功率需要，增强了续航能力。检测机器人在不同形状的管道内行驶时，内置的压缩机构能够使检测机器人的车轮以适中的压力贴紧管壁，从而保证其在获得足够动力的同时，减少滚动摩擦力，以提升其机械效率。

在电气系统中，中央处理单元 ESP32-WROOM-32E 作为核心组件，在指定引脚上接收来自遥控接收器的 PWM 电信号，并通过其他引脚将转化后的 PWM 信号发送给电机驱动板，进而控制电机旋转方向与转速。遥控模块直接与舵机相连，便于操作者直接、高效地控制车轮转向。此外，该检测机器人使用了双电源电力系统，保证了精密仪器的运行不受电压波动干扰，增强了电气系统的稳定性。

在手动控制系统中，该检测机器人的中央处理单元能够解析来自遥控模块的电信号，获取其高电平时长，并按照实验得到的算法求得其应当向电机驱动板发送 PWM 信号的占空比。该算法保证了电机空载时的转速与遥控器上的控制杆被推动的角度大致成正比，方便了用户的精准操作。

在自动控制与计算机视觉方面，该检测机器人能够通过 HTTP 通信协议将摄像头捕捉的画面传输到 PC 机中。采用图像分析技术识别发射的激光束，进而对弯管中心线行进方向进行测算。得到检测机器人的运动与姿态信息后，通过分析位置与姿态信息形成运动指令，并将其发送至中央处理单元，从而对检测机器人的车轮加以控制，实现自动导航。

综上所述，本文提出了一款燃气管道内检测机器人的设计方案，并对其传感、驱动与控制技术进行研究。通过对组装的样机进行实验，根据数据证实了该检测机器人具备功耗低、通过性强、稳定性高、自主性较强等优点。该设计方案有望对燃气管道内检测工作提供一种解决思路。

关键词：机器人、自动化、管道内检测、计算机视觉、自主导航

Title: A Design of a Wheeled In-pipe Inspection Robot for Natural Gas Pipelines and the Study of its Sensing, Driving and Control

Author: Muzhou Wang

## Abstract

In the rapidly developing modern society, the scale of natural gas pipelines has continued to expand. However, the inspection and maintenance lack highly automated machines and they rely primarily on manual inspections, which is probable to make mistakes and often not efficient. Therefore, it is difficult to monitor the internal conditions of pipelines and get digital information in this way. Due to the complicated environment of underground pipelines, there are significant safety issues for workers in such limited places. To solve these problems, a highly automated in-pipe inspection robot for natural gas pipelines has been designed. This article introduces the design scheme of mechanical structure, electrical system, manual control system, and computer-vision-based automatic control system and explains how they work. The aim is to design and assemble an in-pipe inspection robot with strong passability, high autonomy, and high stability. In the latter section, its performance is assessed according to the above three standards. The experimental data proves that it has good performance and capability.

To begin with, this article proposes a mechanical design scheme for a wheeled in-pipe inspection robot with single section. It is suitable for inspection tasks inside gas pipelines with an inner diameter of 150mm. The smaller mass reduces the power required to drive the robot and makes the inspection robot work longer. When the inspection robot travels in pipes of different shapes, the compression mechanism in the middle can press the wheels of the inspection robot to the pipe wall with suitable pressure. This mechanism ensures that it obtain sufficient static frictional forces for driving while reducing rolling friction to improve its efficiency.

Second, the signal is sent to the motor drive board to control the direction and speed of motor rotation. The remote-control receiver is directly connected to the servos, so that the operator can manipulate the steering angle directly. In addition, the inspection robot uses a power system consist of two batteries. The design of such power system contributes to robustness of the precise instruments against voltage variations and the stability of the electrical system.

In the manual control system, the central processing unit of the inspection robot can receive the electronic signals from the remote-control receiver and get their high-voltage duration. The duty cycle of the PWM signal that should be sent to the motor driving board is calculated, according to the algorithm deduced from the experiments. This algorithm regulates the speed of the motor when unloaded to be almost directly proportional to the angular position of the control lever on the remote controller. The setting makes it convenient for users to operate accurately.

In the automatic control system and computer vision, the images from the camera can be transferred to the PC via the HTTP protocol. After that, the image processing technology is employed to identify the two laser dots. Then, PC calculates the direction of the line at which the curved pipe goes. When the location of the

inspection robot relative to the curved pipe is determined, commands of motion are deduced by processing the position according to the geometry. These commands are further sent to the central processing unit to control the rotation of wheels on the inspection robot and realize automatic navigation.

In summary, this article designs a plan for an in-pipe inspection robot for natural gas pipelines and studies its sensing, driving, and control technologies. The experiments on the assembled prototype can conclude that the inspection robot has the advantages of low power usage, strong passability, high stability, and high level of automation. The design scheme is expected to provide a solution for the internal inspection of pipelines which transport natural gas.

Keywords: robots, automation, in-pipe inspection, computer vision, automatic navigation

## 目录

### 第一章 引言

1. 研究意义
2. 研究背景以及现状
3. 本研究主要内容及目标

### 第二章 机械设计与电气系统

1. 结构概况
2. 机械运行方式
3. 电气系统
4. 检测系统

### 第三章 控制系统及计算机视觉

1. 控制系统概况
2. 手动控制
  - 2.1 输入 PWM 信号高电平时长的获取
  - 2.2 输入 PWM 高电平的时长与输出 PWM 信号占空比之间的映射关系
  - 2.3 特定占空比的 PWM 信号的输出
3. 计算机视觉与自动控制
  - 3.1 图像传输
  - 3.2 图像处理与测距
  - 3.3 空间定位与姿态估计
  - 3.4 控制指令生成与传输

### 第四章 燃气管道内检测机器人性能评估

1. 通过性
2. 自主性
3. 稳定性
4. 结论

### 第五章 总结与评价

1. 本文内容总结
2. 对研究的反思与评价

### 参考文献

### 致谢

# 第一章 引言

## 1. 研究意义

在当代城镇中，管道系统的应用十分广泛，天然气、石油等运输介质的需求日益增大。根据国家能源局《中国天然气发展报告（2024）》，2023 年中国长输天然气管道总里程达到了 12.4 万千米，全年天然气消费量为 3945 亿立方米。由此可见，天然气管道在能源运输中扮演了十分重要的角色。然而，这些管道易遭受多种因素的破坏。在复杂的地下环境中，管道长期与地下水、土壤直接接触，容易产生电化学反应，受到侵蚀；若管道未能深埋于地下，地面空气中的氧气等成分易造成锈蚀<sup>[2]</sup>。这些因素都可能导致其结构老化受损。另外，在施工过程中挖掘机等设备的不规范使用更是巨大的安全风险。上述因素导致的管道泄漏时有发生，不仅造成了巨额的经济财产损失，还对周边居民的生命安全构成严重威胁。根据数据，2021 年 5 月至 2022 年 9 月，中国发生影响较大的燃气事故 179 起<sup>[1]</sup>。燃气管道爆炸的事故一旦发生，造成的伤亡将难以估计。由此可见，管道系统的维修保养工作势在必行。然而，面对庞杂的燃气管网，人工检修不仅耗时长、容易漏检，在封闭空间内作业也构成了很高的安全风险。因此，设计出能够用于燃气管道检测的自动化机器人成为了当下保障城镇能源安全的需求。

## 2. 研究背景以及现状

近年来，许多国内外的科研团队都曾对管道检测机器人进行研究并取得了一定进展，管道机器人的设计方案多种多样，并且市场上不乏已经投入工业化生产的机器人<sup>[10]</sup>。

管道检测任务可以分为内检测与外检测两种方式。由于外检测大多局限于探测管道外壁是否存在明显泄露情况，难以探测到管道内壁的金属疲劳等缺陷，因此排查潜在安全隐患的能力不足。然而，与外检测相比，内检测对检测机器的通过性等技术要求更高，机械结构的布局方式需要更加紧凑。综合二者各自的优缺点，由于内检测具备提前预警的压倒性优势，本研究选取了内检测方案。

如果按照驱动方式进行分类，常见的管道检测机器人包括了主动式与被动式检测机器人。主动式检测机器人依靠自身提供的动力行进，如车轮、履带等结构；而被动式通常依靠外部动力源行进，例如借助管道运输介质的压力或是外部人员对绳索的操作。依靠外部动力源的管道机器人大多难以精确控制其运动姿态，同时也面临着动力不足、通过性差的问题。因此，本研究采用了主动式管道内检测机器人。

主动式管道检测机器人又可以细分为履带式、轮式、腿足式以及螺旋推进式等运动类型。

履带式管道检测机器人通常具备动力强、抓地良好的优势，这使得其通过性强。但同时由于其相对复杂的机械结构，尺寸较大，不适应小内径的燃气管道检测任务；较大的总质量也致使其需要较大驱动力，能耗较高。根据第一种履带式管道检测机器人（如图 1.1 所示）的设计数据<sup>[3]</sup>，其质量约为 45.8kg，可适应直径在 905mm 至 1200mm 范围内的管道，能够以 5.3m/min 的速度续航 65 分钟。

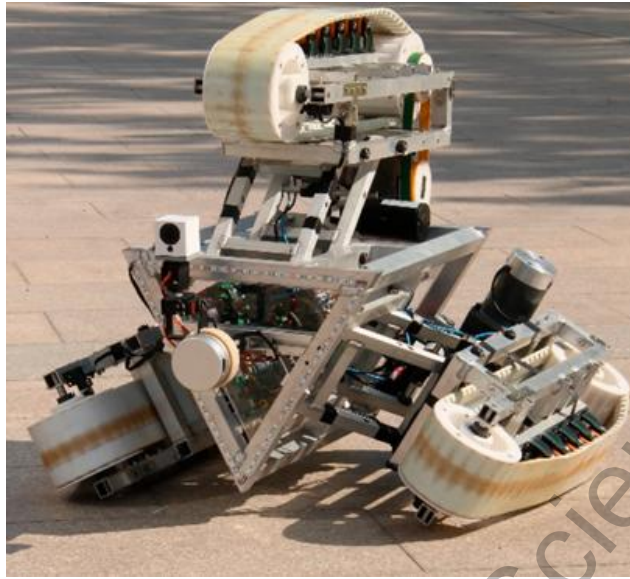


图 1.1 第一种履带式管道检测机器人<sup>[3]</sup>



图 1.2 第二种履带式管道检测机器人<sup>[4]</sup>

如图 1.2 所示的第二种履带式检测机器人的减速比大，所需齿轮等传动结构较多，导致其质量较大，其数据如表 1.1 所示<sup>[4]</sup>。而本研究中采用了轻量化设计，燃气管道内检测机器人的总质量仅为 1.1kg，因此对电机的功率、转速和扭矩要求较低，从而降低了能耗。该履带式检测机器人的电机所需功率、转速与扭矩的数据如表 1.1(a)所示；而本文设计的检测机器人单个电机的功率在 3.3W 以下，4 个电机的总功率不超过 13.2W。对比表(a)和(b)可知，相比于该履带式管道检测机器人，本文的检测机器人能耗大幅减少。

|                   |                      |
|-------------------|----------------------|
| 总质量( $kg$ )       | 1.8                  |
| 单个电机功率( $W$ )     | 30                   |
| 转速( $rpm$ )       | 38100                |
| 扭矩( $N \cdot m$ ) | $8.3 \times 10^{-3}$ |

(a)

|                      |                       |
|----------------------|-----------------------|
| 总质量( $kg$ )          | 1.1                   |
| 单个电机功率 ( $W$ )       | 3.3                   |
| 最高转速 ( $rpm$ )       | 8000                  |
| 最大扭矩 ( $N \cdot m$ ) | $2.06 \times 10^{-3}$ |

(b)

表 1.1 第二种履带式管道检测机器人与本研究中轮式管道检测机器人性能参数的对比 (a)该履带式管道检测机器人的性能参数<sup>[4]</sup> (b)本研究中轮式管道检测机器人的性能参数

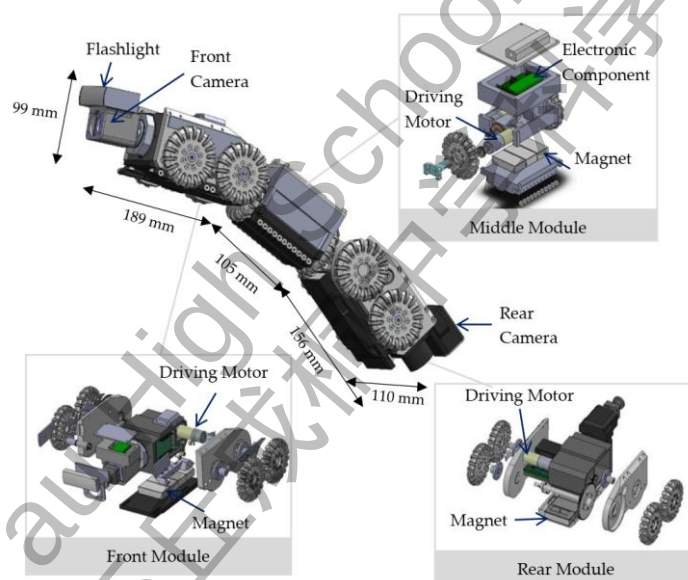


图 1.3 一款多节轮式管道检测机器人<sup>[5]</sup>

轮式管道检测机器人由于灵活度高、速度快、动力较强等优点，在管道检测任务中应用较为广泛。图 1.3 所示的这款检测机器人在三节车厢上配备了全向轮，前后两个车厢能够驱动检测机器人沿管道轴向平动，而位于中间的车厢的全向轮可以使车体产生关于轴线的自转，进而实现较高的运动自由度。然而，该车厢式结构导致车身总长约为 450mm，通过转向半径较小的弯管时车身易与管壁摩擦，引起车轮抓地力不足<sup>[5]</sup>。考虑到多节轮式运动方案在通过性中的缺陷，本文中设计了总长仅为 374mm 的单节轮式检测机器人，同时采用了 41mm 的高底盘设计，保证了车轮与管壁的充分接触，增强了其通过性。在电气系统中，该多节轮式检测机器人需要 48V 直流电源为电机供电，且其他电气模块所需电压不尽相同，需要大量 DC-DC 升压或降压电路，如图 1.4 所示。而本文中设计的检测机器人仅需两个 5V 锂电池电源即可在为电机提供足够驱动力的同时维持单片机、摄像头、遥控信号接收器的稳定运行。

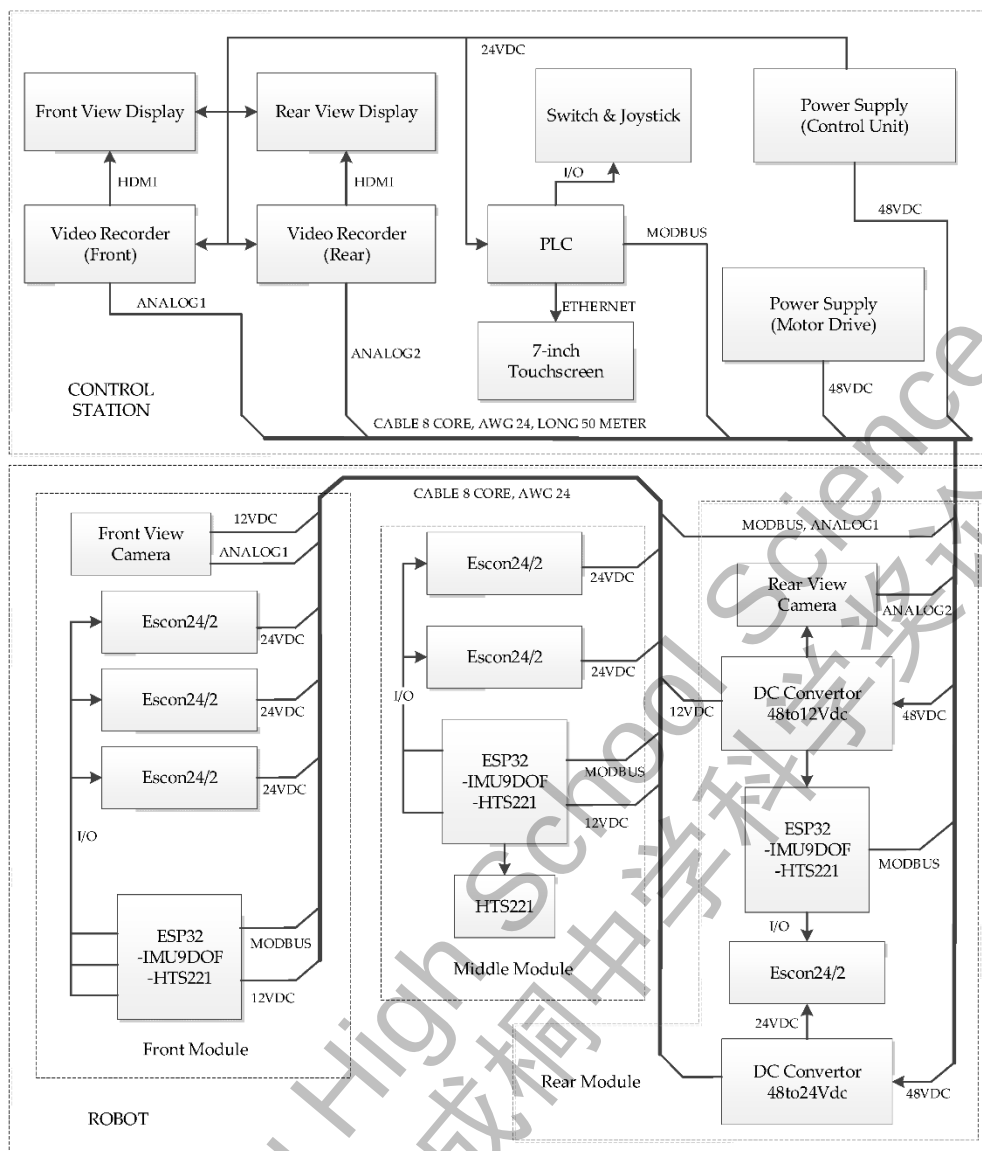


图 1.4 多节轮式管道检测机器人的电气系统与控制系统<sup>[5]</sup>

腿足式管道检测机器人的优势在于推进力强、灵活度高，其设计构型具有仿生意义。图 1.5 所示的腿足式检测机器人通过两侧的足结构抓紧管壁并推动机器人主体前行。该检测机器人能够持续提供 300N 的推力，或间歇式输出最大 403N 的推进力，基本满足通过性的需要。但由于腿足的单次行程短，导致其运动速度缓慢，不利于检测效率的提升。如图 1.6 所示，考虑到腿足的往复运动需要建立物理模型加以协调，所以涉及的控制系統难以精简<sup>[7]</sup>。

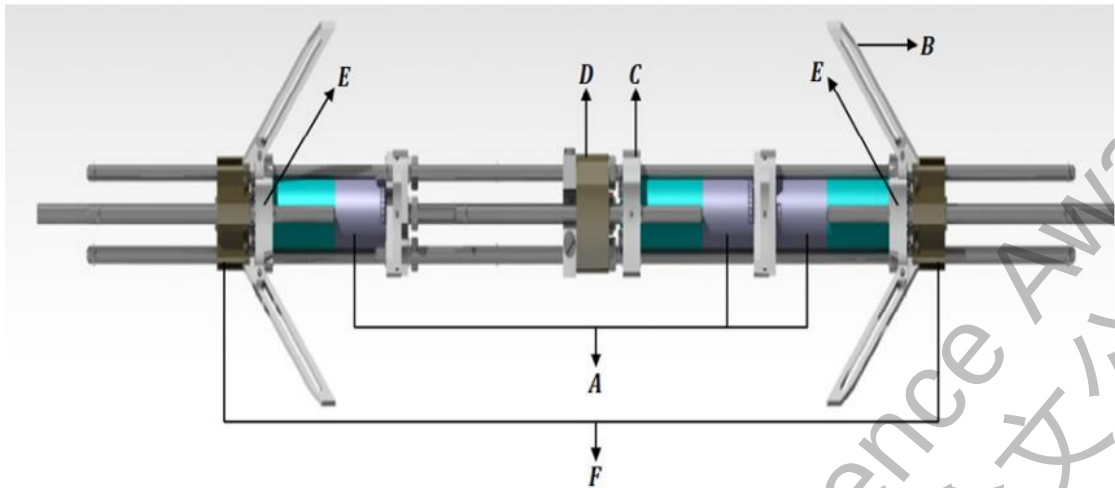


图 1.5 第一种腿足式管道检测机器人的结构[7]

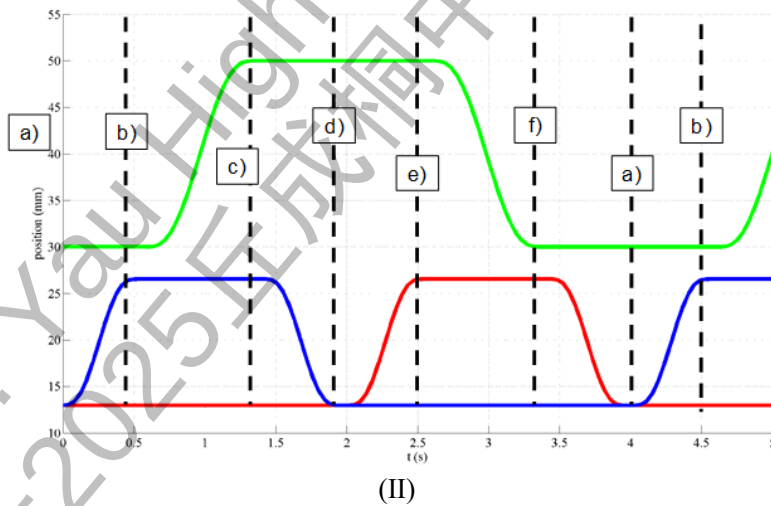
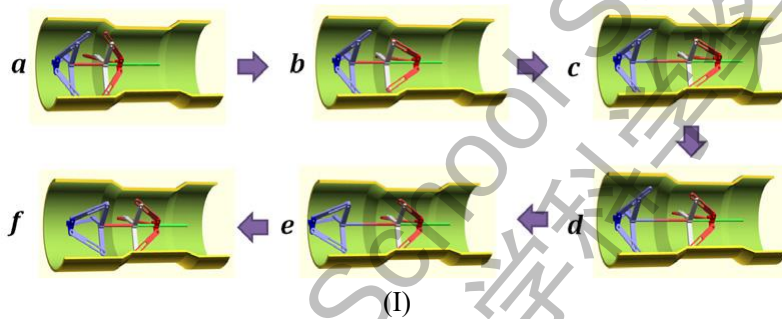


图 1.6 第一种腿足式管道检测机器人的运动方式 (I)整体的运动方式 (II)各关节与致动器在一个运动周期内的位置

图 1.7 所示的腿足式管道检测机器人结构简单，能够通过较小内径（内直径在 100mm 至 300mm 范围内）的管道。检测机器人采用致动装置对管壁施加压力，从而获取足够摩擦力，推动检测机器人行进。根据其计算结果，当压力总和为 266.1N 时，腿足能够提供的摩擦力共计 87.81 N，足以推进该检测机器人及其附带的电、气线路。但是，其中部的气动装置需要外置的空气压缩机工作，总控单元也位于管道以外，因此需要布设线路，这极大限制了检测机器人的运动距离；

当运行检测机器人运行时，拖拽的线缆增大了运动的阻力，不利于检测工作的便捷性<sup>[8]</sup>。

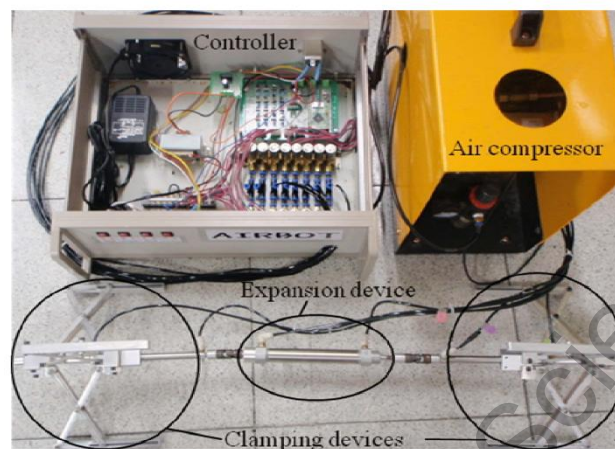


图 1.7 基于气动装置的腿足式管道检测机器人<sup>[8]</sup>

螺旋推进式的管道检测机器人的结构简省，控制系统简单。如图 1.8 所示，位于中部的电机模块驱动上转子绕轴向旋转，上转子的 3 个车轮产生斜向上的推进力，带动定子共同向上运动。该运动模式实现了较小的空间占用，适合内半径为 76mm 的管道检测任务。然而，由于此类螺旋的运动方式，车轮所经路径无法实现最小化，降低了机器人在轴向的行进速度<sup>[9]</sup>。

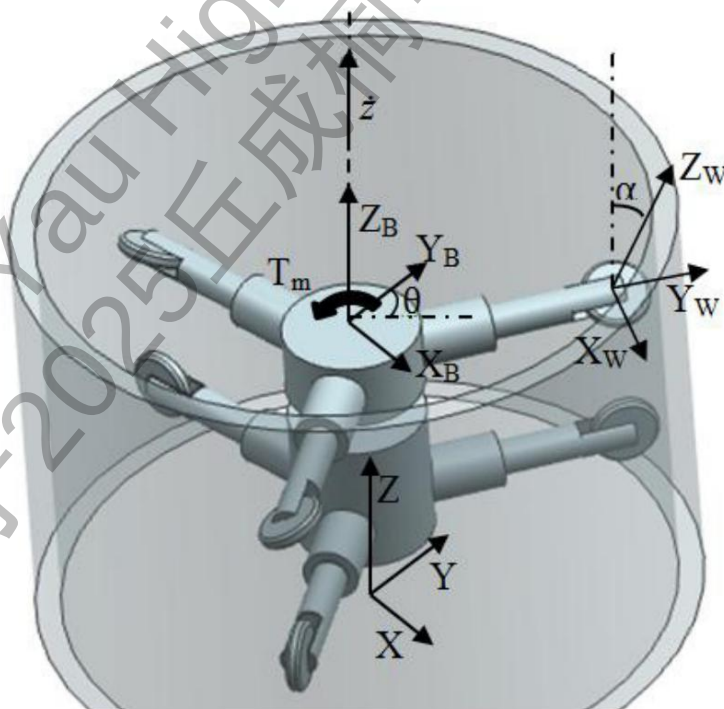


图 1.8 螺旋推进式管道检测机器人<sup>[9]</sup>

### 3. 本研究主要内容及目标

基于上述常见的管道检测机器人构造方式以及各自的优劣，考虑到轮式检测机器人的综合性能较为优越，兼顾了动力、速度与灵活度等方面，本研究对多节式结构进行优化处理，提出了一种轮式单节的燃气管道内检测机器人设计方案。本文将从机械设计、电气系统、控制系统以及计算机视觉与导航等方面介绍该燃气管道内检测机器人的运行原理，并通过仿真实验证明该机器人的性能良好。

考虑到管道中的实际应用场景，本研究致力于提升管道机器人的通过性、自主性以及稳定性。在通过性方面要求该机器人能够正常通过直管、弯管并在竖直方向克服重力运动。对于自主性，检测机器人在经过弯管前应当依托机载摄像头获取图像并传输至PC机中，随后应用计算机视觉算法分析图像并得到管道中心线行进方向，获取检测机器人的运动姿态等信息，据此向检测机器人发出控制命令，指导其螺旋运动至适当位置以顺利通过弯管，最终实现自主导航。

## 第二章 机械设计与电气系统

### 1. 结构概况

整个燃气管道内检测机器人长为 374mm，宽为 50mm，高（上层车轮的最高点与下层车轮的最低点之间的高度差）可在 111.8mm 至 138.8mm 的范围内动态调整，以应对 DN150 燃气管道内直管与弯管的变化，适应内径在 140mm 至 160mm 范围内的直管。检测机器人采取了轻量化设计，总质量约为 1.1kg，因此较小的驱动力即可确保其通过性；该设计也降低了整体能耗，提高了续航能力。检测机器人分为上、中、下三层主体结构（如图 2.1 所示），分别命名为长车架、压缩板与短车架，它们通过四根导向柱互相连接，并可以在竖直方向滑动。其中，长车架与短车架各自具有两个驱动模块（一个转向舵机和一个含电机的变速箱组成一个驱动模块）。压缩板通过一个螺纹杆与长车架上的推进舵机相连，螺纹杆旋转时带动压缩板升降，夹于短车架和压缩板之间的四根弹簧可以沿四根导向柱的方向被压缩。

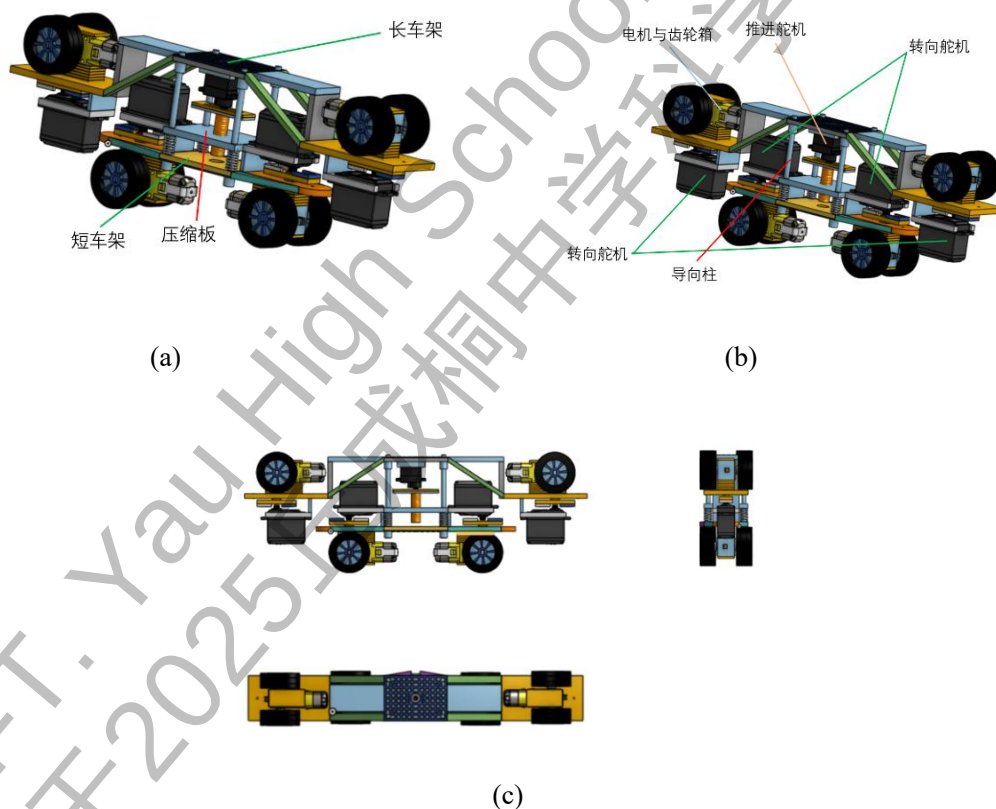


图 2.1 燃气管道内检测机器人整体结构布局 (a)(b)各结构名称 (c)燃气管道内检测机器人的三视图

### 2. 机械运行方式

该燃气管道内检测机器人通过位于长车架的推进舵机旋转，驱动螺纹杆旋转，进而控制中层的压缩板上下运动。当螺纹杆推动压缩板向下运动时，夹在短车架与压缩板之间的弹簧被压缩到一定程度，产生合适的压力，使检测车的 8 个轮紧

贴管壁。当车轮与管壁之间的压力过大时，滚动摩擦力也随之变大。因此，只有在需要较大的动力时，弹簧才需要被大幅压缩。当检测车无需更多动力时，弹簧无需被进一步压缩，以此来减少阻力。可见，该压缩机构可以调节弹簧提供的弹力，从而实现最大驱动力与机械效率之间的平衡。在检测车中央处理单元的指令下，四个电机带动轮子旋转，产生推力。

位于长、短车架上的 4 个转向舵机与相应的驱动模块连接，可以控制车轮的朝向，进而调整检测车的行进方向。当 8 个车轮的方向与检测机器人的长的方向一致时，机器人沿管道轴向方向运动。当 8 个车轮按照一定规律转向时，检测机器人可以在相对于管道平动的同时发生转动（如图 2.2 所示），以此来调整机器人的姿态。这种转向机构在检测机器人经过弯管时尤为重要，能够使机器人的车轮平行于弯管旋转半径所在平面，从而确保车轮不会在管壁上打滑（如图 2.3 所示）。另外，在管道内遇到障碍时，检测机器人能够依靠该转向系统绕行。由此可见，该转向技术大幅提升了其灵活度与通过性。

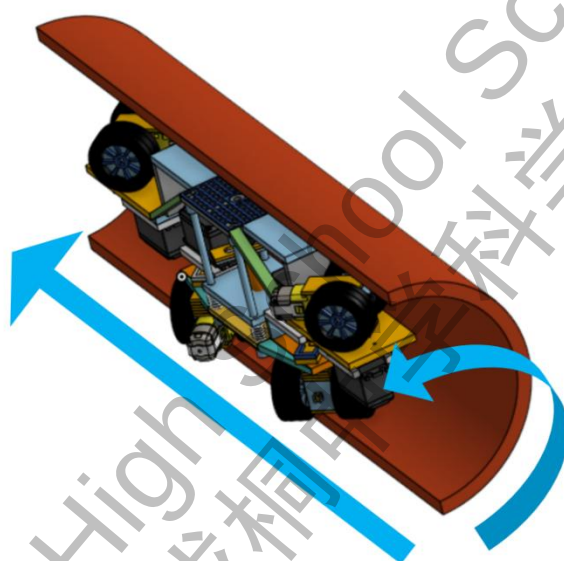
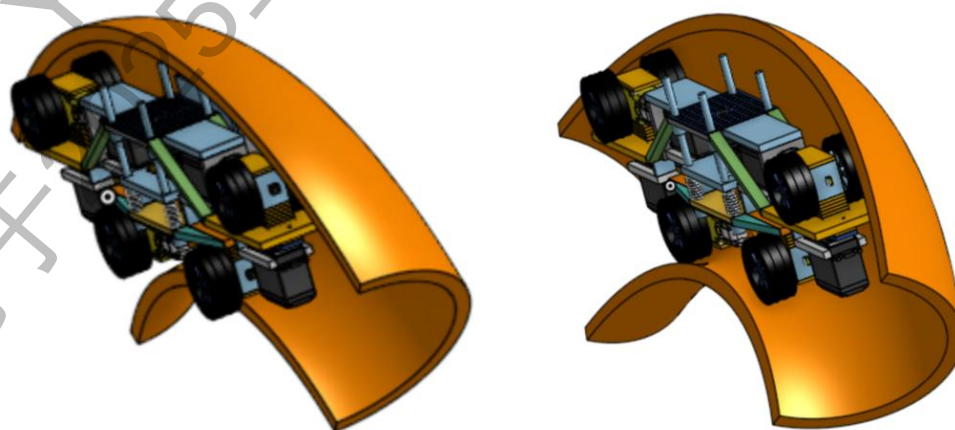


图 2.2 燃气管道内检测机器人运动方式示意图



(a)正确姿态

(b)错误姿态

图 2.3 燃气管道内检测机器人的不同姿态

### 3. 电气系统

整个电气系统主要由电源、遥控模块、中央处理单元、电机驱动板、摄像模块构成。电气系统的组成方式如图 2.4 所示。4 个舵机直接与遥控模块连接；来自遥控信号接收器的电信号输入到中央处理单元中，随后中央处理单元输出信号到电机驱动板中，经放大后驱动电机转动。

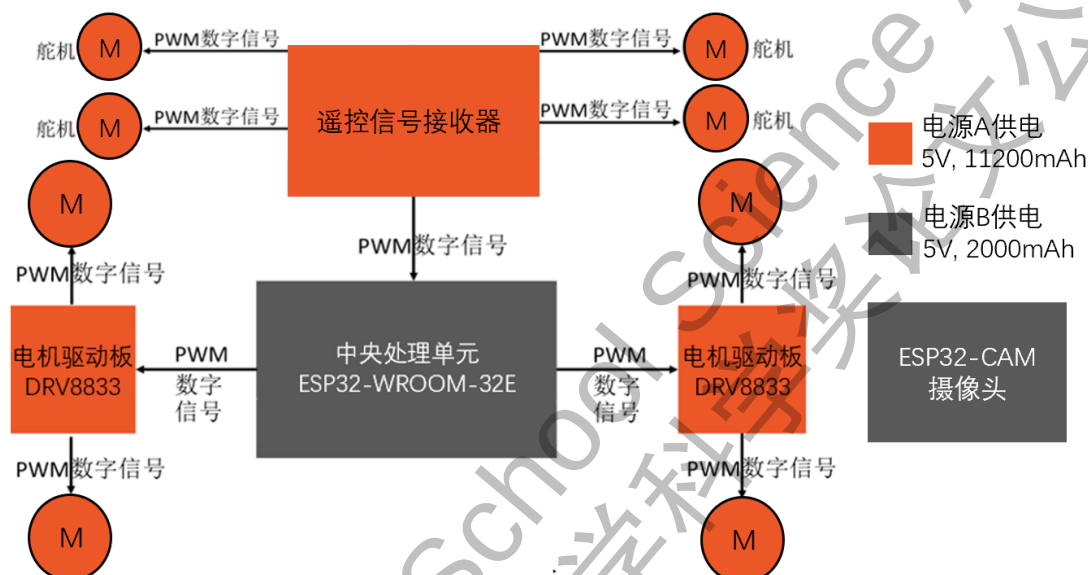


图 2.4 电气系统的组成

该燃气管道检测机器人采用了双电源系统，电源 A 为包括电机与舵机的动力模块供电，电源 B 为遥控模块、中央处理单元与摄像头模块供电。其中，动力电源采用了规格为 5V，11200mAh 的锂电池，具备容量大、能量密度高等优点，充满电状态下可连续运行 5 小时，满足持续驱动的需要。该双电源系统保证了精密电路的电压恒定，其内部进程运行稳定。

遥控模块采用了遥控信号发射器与遥控信号接收器的组合，信号有效传输距离可达 200 米，在第四章提到的实验过程中从未出现失灵情形，通讯状态稳定。

中央处理单元为单片机 ESP32-WROOM-32E。其优势在于能耗低、运行效率高、故障率低等。该单片机含有多个 GPIO 引脚，适合多组 PWM 电信号接收与发送的工作。在实际应用中，中央处理单元负责将从遥控模块传输的 PWM 电信号转化为一定占空比的 PWM 信号，并在指定的引脚上输出，用于控制机械组件的运动。因此多个 GPIO 引脚对多组电机和舵机的控制有利。此外，由于 ESP32-WROOM-32E 内置 WiFi 与 Bluetooth 模块，且应用 Arduino 开发的技术较为成熟，因此便利了自动控制系统的搭建流程。

电机驱动板选用了 DRV8833。该电机驱动板的额定电流为 1.5A，而电机堵转时峰值电流约为 0.68A，因此可以满足驱动电机的需要。内置 H 桥切换输出引脚的正负极，从而改变电机的旋转方向。改变 PWM 信号的占空比，可以调节输出的等效电压，便于控制电机的转速。

#### 4. 检测系统

在检测过程中，应用了激光测距仪对管道内壁进行扫描，从而获取管道结构的数据。主要的工作原理为：通过调整激光发射的角度 $\theta_i$ ，可以测得管壁上不同的点 $B_i$ 到激光发射器的距离 $d_i$ 。再根据几何模型，能够得到各点与管道中心点 $O$ 的距离，记为 $r_i$ （如图 2.5 所示）。

根据几何原理，可以得到点 $B_i$ 的坐标为 $(a+d_i\cos\theta_i, d_i\sin\theta_i)$

由勾股定理可得距离的表达式： $r_i = \sqrt{(a+d_i\cos\theta_i)^2 + (d_i\sin\theta_i)^2}$

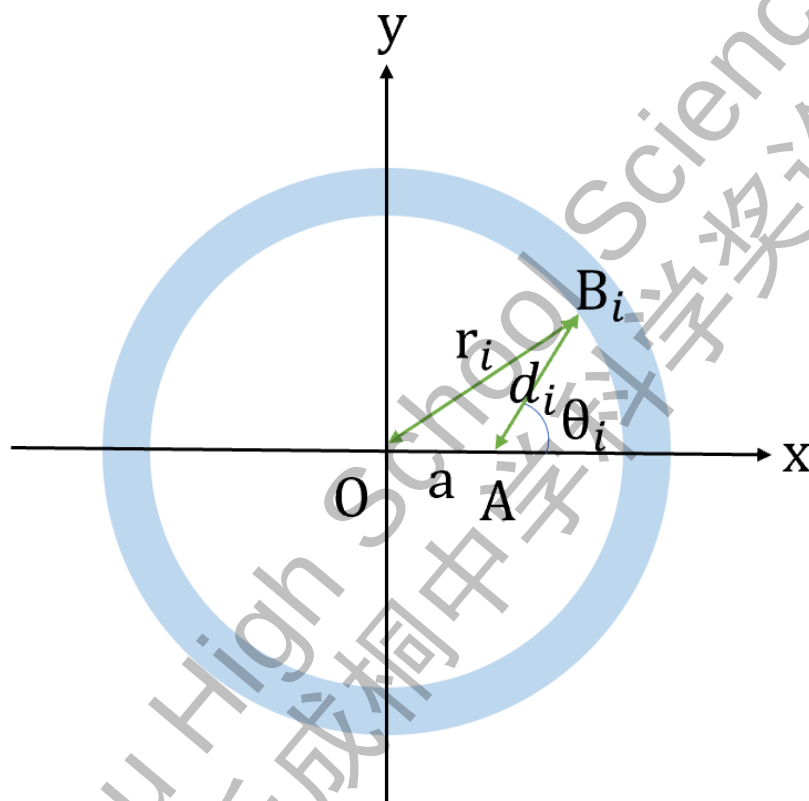


图 2.5 管道检测的几何模型

为了对上述的检测方法进行初步验证，构造了管道内存在异物的情形（如图 2.6 所示）。根据理论计算，获取了图 2.7 中距离 $r$ 关于发射角度 $\theta$ 的函数图像。当 $\theta$ 约为 $240^\circ$ 时， $r$ 值出现了明显下降，表示管壁出现不规则形状。由此可见，通过激光发射器扫描，可以快速监测管壁的形变程度或是探测异物，从而及时发现管道结构的受损情况，开展维修工作。

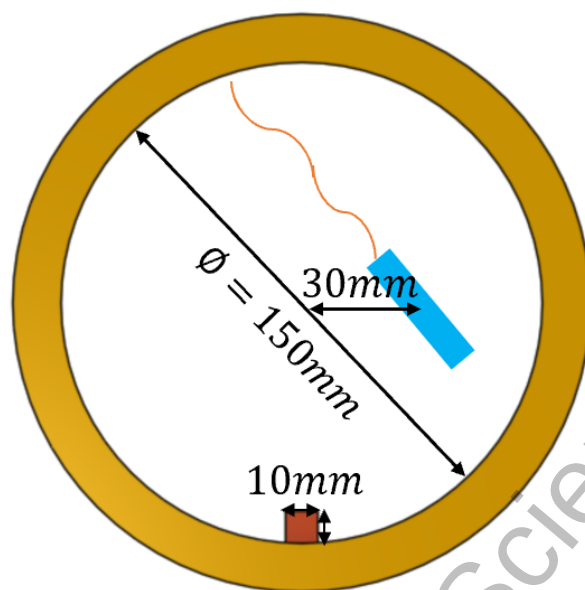


图 2.6 管道异常情形

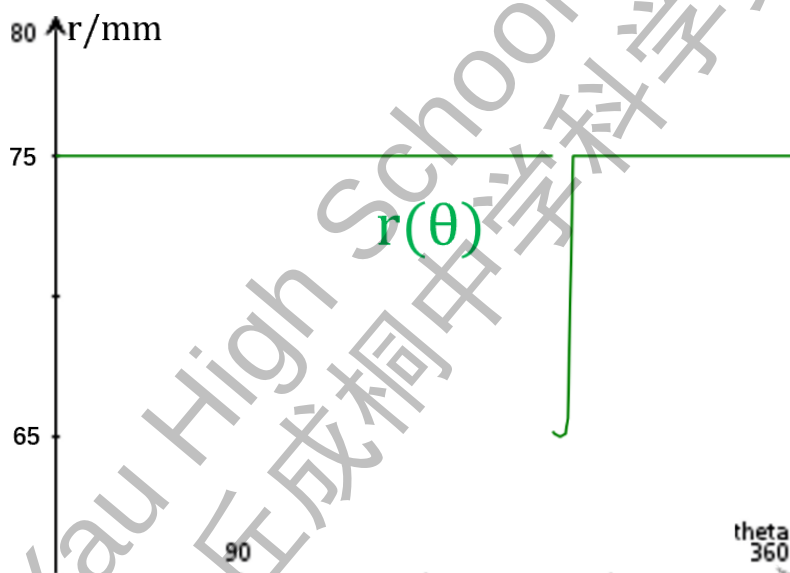


图 2.7  $r$ 关于 $\theta$ 的函数图像

## 第三章 控制系统及计算机视觉

### 1. 控制系统概况

燃气管道内检测机器人具备手动与自动的控制方式，两种控制方式不可同时进行（如图 3.1 所示）。

在手动模式下，操作者推动遥控器控制杆，遥控信号接收器将遥控器发送的电磁信号转化为四个通道上的 PWM（全称 Pulse Width Modulation，即脉冲宽度调制）信号，其中一个通道直接与舵机相连，便于高效地控制车轮角度；第二个通道上的 PWM 信号被传递至中央处理单元，用于获取输入 PWM 信号的高电平时间长度，再按照一定的映射关系计算输出 PWM 信号的占空比，并按照此占空比在指定引脚上输出该 PWM 信号，进而对电机的旋转方向和转速加以控制。

在自动模式下，位于燃气管道内检测机器人前后两侧的摄像头将光信号转化为电信号，并通过 HTTP 通信协议传输至 PC 机端，经过图像处理、测距、空间定位等过程后根据弯管的三维模型得到该检测机器人的位置与姿态的信息，以形成控制运动的指令，进而实现自主运动的能力。

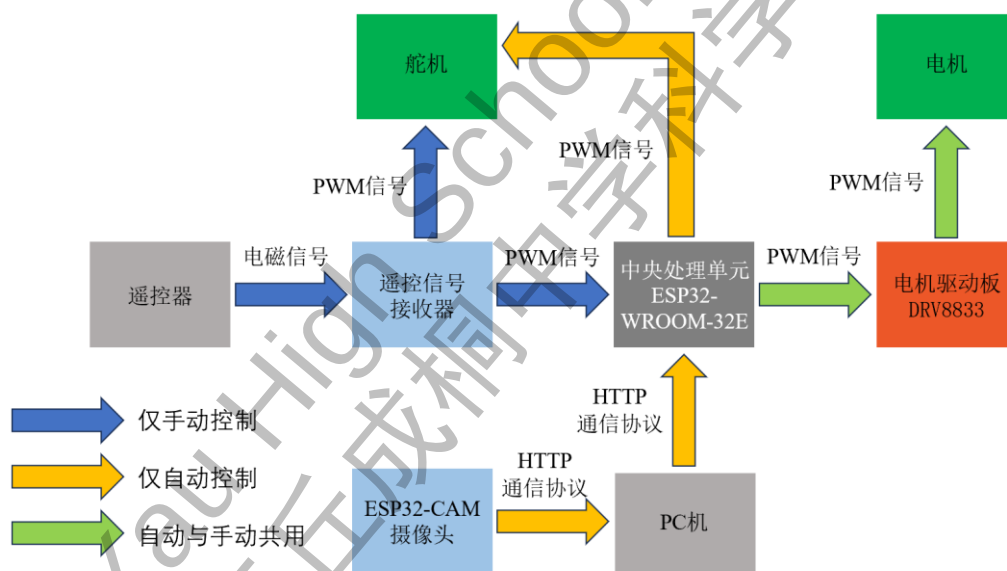


图 3.1 控制系统信息传递线路

### 2. 手动控制

#### 2.1 输入 PWM 信号高电平时长的获取

输入的 PWM 信号高电平时长能够推算出遥控器的控制杆被推动的距离，从而将所得信息进行处理，最终实现对电机转速的控制。因此，获取输入 PWM 信号的高电平时长对于整个控制系统的精准运作尤为关键。

在获取输入 PWM 信号高电平的持续时间时，需要按照两种情况讨论：

(1)初次接受到的信号为高电平；(2)初次接受到的信号为低电平。

在(1)情况下，由于不确定中央处理单元初次接收到的高电平信号是否为遥控模块发射的首个高电平信号，故从此刻计数到此次高电平结束的时刻不一定得到准确的结果；因此，应当等到随后的低电平信号结束后再开始计时，此时将经历

一个完整的高电平时间段，故可以得到准确的结果。

在(2)的情况下，直接等到低电平结束后开始计时，直到随后的高电平结束时停止计时，同样可获得准确的高电平持续时间。

然而，实际上程序无需对以上 2 种情况判断，即可完成对高电平时间的计量。通过 3 个 while 循环的依次执行（如图 3.2），即可实现该功能：

```
int find_PWM_HIGH_time()//10ms MAX
{
    int count=0;
    while(digitalRead(5)==HIGH && count < 60)//3ms MAX
    {
        delayMicroseconds(50);//等待50微秒
        count++;
    }
    count = 0;
    while(digitalRead(5)==LOW && count < 60)//3ms MAX
    {
        delayMicroseconds(50);
        count++;
    }
    while(count < 60 && digitalRead(5)==HIGH)//3ms MAX
    {
        count++;
        delayMicroseconds(50);
    }
    return count*50;
}
```

图 3.2 高电平持续时长获取的部分代码

当遇到(1)中的情形时，第 1 个 while 循环持续运行，直至高电平结束，第 2 个 while 循环立即开始，持续运行直至低电平结束，第 3 个 while 循环用于计量一段完整的高电平持续时长；

当遇到(2)中的情形时，第 1 个 while 循环将被跳过，随后的第 2 个 while 循环持续运行直至低电平结束，第 3 个 while 循环用于计量一段完整的高电平持续时长。

因此，无论初次接受到的信号处于高电平还是低电平，第 3 个 while 循环始终用于对真正目标的计时。这样的设计逻辑，不仅降低了整体程序的复杂度，减少了该程序在中央处理单元中所占用的空间，还加快了程序运行速度，增加了整个控制系统的运行效率。

## 2.2 输入 PWM 高电平的时长与输出 PWM 信号占空比之间的映射关系

为了方便操作者使用遥控器的控制杆调整电机转速，一套将输入的 PWM 信号的高电平时长和输出 PWM 信号的占空比关联起来的算法建立起来。

由于输入 PWM 信号的高电平时长与控制杆推动距离大致成线性关系，而同时设计的电机空载转速应当与控制杆推动距离成正比。根据物理模型，在理想状

态下，电机空载时的转速与其转子两端电压成正比，其电压又和向电机发送的 PWM 信号占空比成正比。所以理论上的输出 PWM 信号的占空比应当与输入 PWM 信号的高电平时长成线性关系。依据该推论，将输入 PWM 高电平的时长与输出 PWM 信号占空比对应起来的算法被确立下来（如图 3.3 所示）。

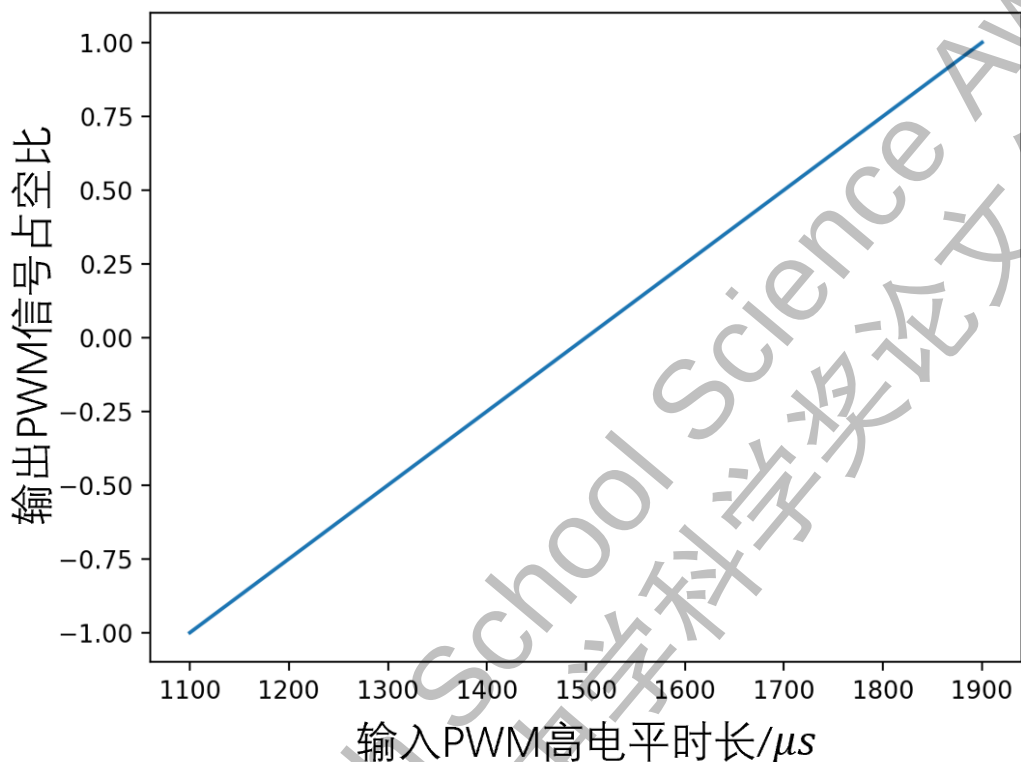


图 3.3 输出 PWM 占空比与输入 PWM 高电平时长之间的映射关系

经过实验测试，发现电机在接近空载的状态下，其转速与遥控器控制杆推动距离严重不成正比（如图 3.4 所示）。由于中央控制单元采用单进程芯片，无法兼顾分析输入的 PWM 信号和产生 PWM 信号，故实际的等效电压与占空比无法呈现精确的正比关系。同时，由于电源自身存在内阻，与电机分压时无法保持其断路电压。此外，受中央处理单元运行速度的影响，对于输入 PWM 信号的高电平时长的分辨率有限，故实际输出并非连续。

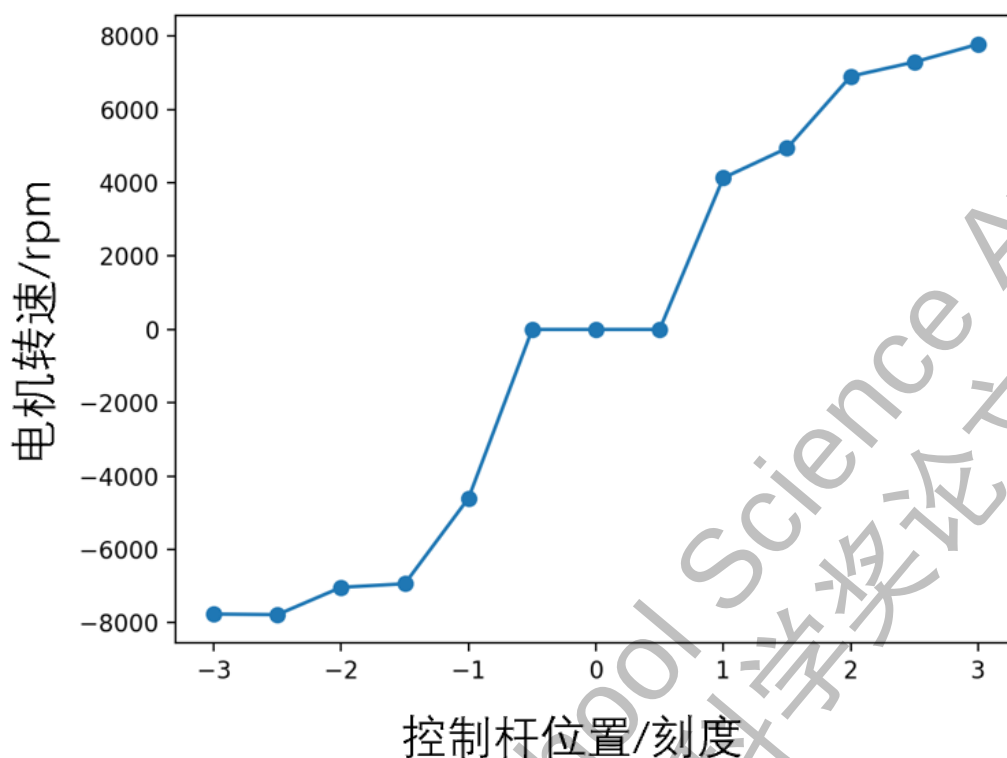


图 3.4 初始算法设定下电机空载转速随着遥控器控制杆推动位置的变化趋势

基于以上情况，开展了进一步实验，通过 Arduino IDE 的串口通讯设定输出 PWM 信号的高电平时长，以此改变占空比，并测算出与之对应的电机空载转速。经反复调节得到最高转速的  $0, 1/3, 1/2, 2/3, 5/6, 1/1$  并将此时 PWM 信号的高电平时长分别记录下来，作为下图 3.4 的纵坐标。同时，将遥控器控制杆分别推到 0 刻度、 $\pm 1$  刻度、 $\pm 1.5$  刻度、 $\pm 2$  刻度、 $\pm 2.5$  刻度和  $\pm 3$  刻度的位置上（由于控制杆位于  $\pm 0.5$  刻度时，电压难以维持电机转动，因此不做考虑），将它们对应的 PWM 高电平时长记为横坐标，进而得到输入 PWM 高电平时长与输出 PWM 的占空比的散点图（即图 3.5 中的“数据点”集合）。

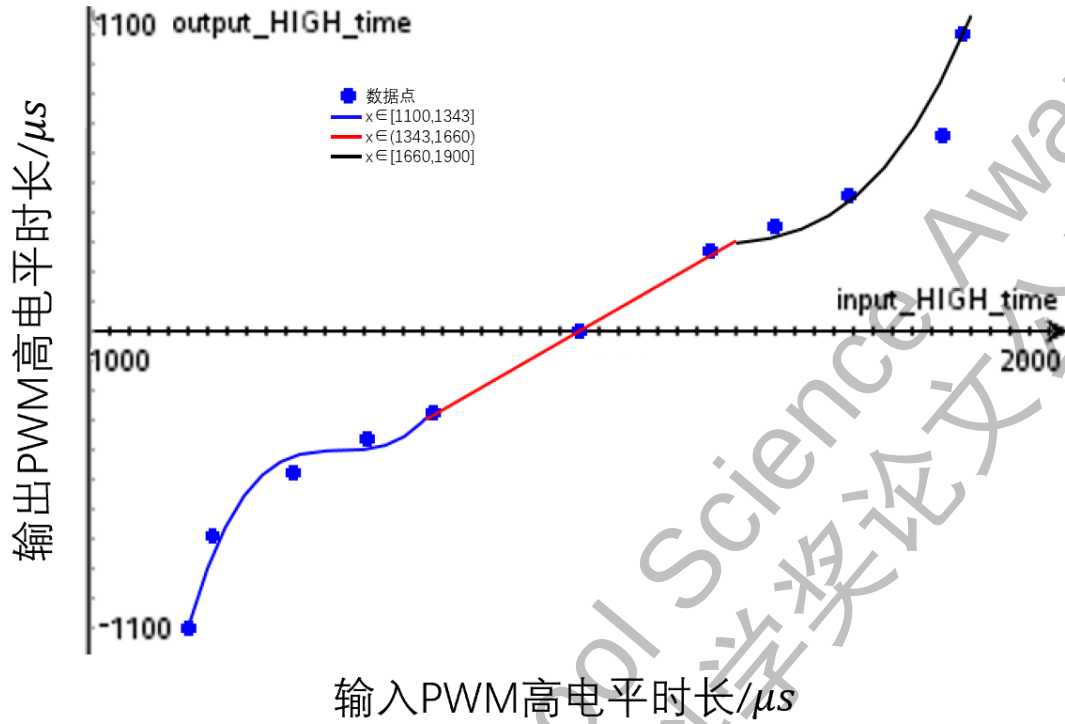
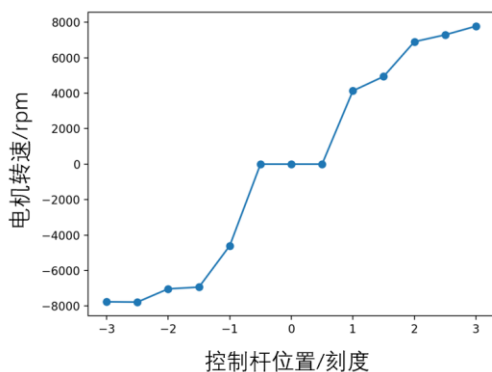


图 3.5 输出 PWM 信号的占空比与输入 PWM 信号的高电平时长之间的映射关系（采用正负性区分不同引脚上的 PWM 信号，便于和电机旋转的方向相对应）

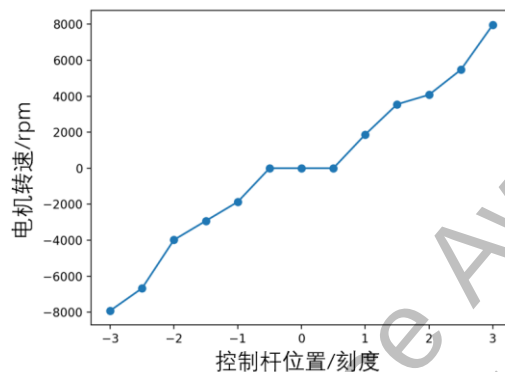
通过对数据图的分析，散点连线呈现单调递增趋势，并基本关于(1500,0)中心对称，且连线的斜率基本随自变量的增大而增大，因此选用关于自变量的三次多项式函数描述二者之间的变化规律。由于点(1500,0)与整体的三次规律不符且产生的电压不足以驱动检测机器人行进，对其附近区域建立函数模型的意义不大，因此使用一条线段连接两部分图像。经过计算处理，输入 PWM 高电平时长 ( $x$ ，单位为微秒 ( $\mu s$ )) 与输出 PWM 的高电平时长 ( $f(x)$ ，单位为微秒 ( $\mu s$ )) 之间的联系由此建立起来：

$$f(x) = \begin{cases} 0.000157348x^3 - 0.592612x^2 + 744.017x, & x \in [1100, 1343] \\ 1.90(x - 1500), & x \in (1343, 1660) \\ 0.00003267x^3 - 0.1584x^2 + 256.091x - 137770, & x \in [1660, 1900] \end{cases}$$

将以上表达式应用于中央处理单元的算法，经过实验测试，得到更新的电机空载转速与遥控器控制杆推动距离之间的关系，如图 3.6 所示。可以发现，相对于原始的二者关系，算法更新后的电机转速与控制杆推动距离之间的关系更加接近线性。仅当控制杆位于  $\pm 0.5$  刻度范围内时，提供的电压无法维持电机运行。因此，经过基于实验数据的算法优化措施，遥控器能够实现对电机转速更为精确的控制，从而提升了检测机器人的运动性能。



(a)



(b)

图 3.6 电机空载转速关于遥控器控制杆位置的函数关系在算法改进前后的对比图 (a)算法改进前 (b)算法改进后

## 2.3 特定占空比的 PWM 信号的输出

在执行 for 循环时，中央处理单元控制指定的引脚处于高电平或低电平以及持续的时长，从而获得所需的占空比。单次循环内，指定的引脚先后处于高电平和低电平，但一个 PWM 周期（二者耗时之和）保持恒定的 1 微秒。通过改变输出 PWM 信号的引脚，能够改变电机电刷两端的电势相对高低，从而改变电机旋转的方向。

通过改变占空比，可以控制一段时间内高电平输出的时长总和，进而调整输出的等效电压。当该交替变换频率足够高时，该输出的作用效果与采用可调电压模拟电路驱动电机的效果相当，使得电机转动较为平顺。

## 3. 计算机视觉与自动控制

### 3.1 图像传输

摄像模块采用了 ESP32-CAM。该模块需要 5V 电压供电，工作电流约为 0.1A，能耗低，适合燃气管道检测任务。该模块可以采用 Arduino UNO 进行编程，易于图像的采集、传输和处理工作。

当 ESP32-CAM 与 PC 接入同一个无线局域网时，通过获取摄像头的 IP 地址即可访问实时的图像信息。该传输方式基于 HTTP 通信协议，通过 3 次“握手”过程检查二者之间的连接，从而保证通信过程的稳定性。

### 3.2 图像处理与测距

为了对燃气管道检测机器人的位置与姿态等信息进行估计，检测机器人配备了激光发射器，能够发射出两束平行且距离为 1cm 的激光。激光发射器连接在舵机组合上，能够调整发射的角度，具备两个自由度。通过分析摄像头返回的图像，PC 机可以计算出两个激光点与摄像头之间的距离。

考虑到激光点在图像中高对比度的性质，同时为了减少原图像处理过程的复杂性，程序首先由 RGB 计算出图像中每个像素的灰度值（依据公式  $I_{gray} =$

$0.299R + 0.587G + 0.114B$ ), 将其作为描述亮度的量, 获得灰度值矩阵。激光在较为黑暗的管壁中大多呈现出高灰度值, 与昏暗背景的灰度值之差明显, 因此 PC 机可以通过识别图像中高灰度值的像素, 从而较为精准地定位激光点。

随后, 针孔模型应用于测距中。由于两束激光相互平行且距离较小, 它们与管道内壁形成 2 个交点, 这 2 个交点之间的距离较小, 与摄像头的距离近似相等。针孔模型描述了摄像机将三维世界中的点投影到二维平面中的重要规律, 该变换可描述为:

$$s \cdot \mathbf{p} = \mathbf{K} \cdot [\mathbf{R} | \mathbf{t}] \cdot \mathbf{P}_\omega$$

其中,  $s$  为尺度因子,  $\mathbf{p} = [u, v, 1]^T$  为三维矢量,  $(u, v)$  表示每一像素在图像中的二维坐标,  $\mathbf{K}$  为  $3 \times 3$  内参矩阵,  $[\mathbf{R} | \mathbf{t}]$  为  $3 \times 4$  矩阵, 表示成像过程中的旋转与平移变换,  $\mathbf{P}_\omega = [X, Y, Z, 1]^T$  为四维矢量,  $(X, Y, Z)$  为真实世界中的三维坐标。

在针孔模型中, 世界中的三维坐标与图像中每一像素的二维坐标建立起了联系, 因此将其作为分析图像的基本理论, 并以此建立起算法, 应用于测距中。

### 3.3 空间定位与姿态估计

在燃气管道检测任务中, 检测机器人需要通过弯管, 然而其以任意姿态入弯时, 无法保证其通过性。因此, 对检测机器人姿态的探测与估计尤为关键。对管道内壁上不同的点进行测距, 可获取各个点与摄像头之间的距离, 再根据三维几何模型确定管道的空间模型, 从而推测检测机器人的位置与姿态。

首先, 建立了弯管的几何模型: 弯管是在  $xy$  平面内两个半径不相等的同心圆之间的平面图形绕与两圆不存在公共点且与  $x$  轴平行的一条直线旋转所形成的立体图形。在 3D 模型中 (如图 3.7 所示),  $z$  轴与初始的管道轴向重合。基于 DN150 燃气管道的构造, 内同心圆的直径为  $D=150\text{mm}$ , 圆心  $O$  (同时也是本坐标系的原点) 与旋转直线  $l$  的距离为  $300\text{mm}$ 。

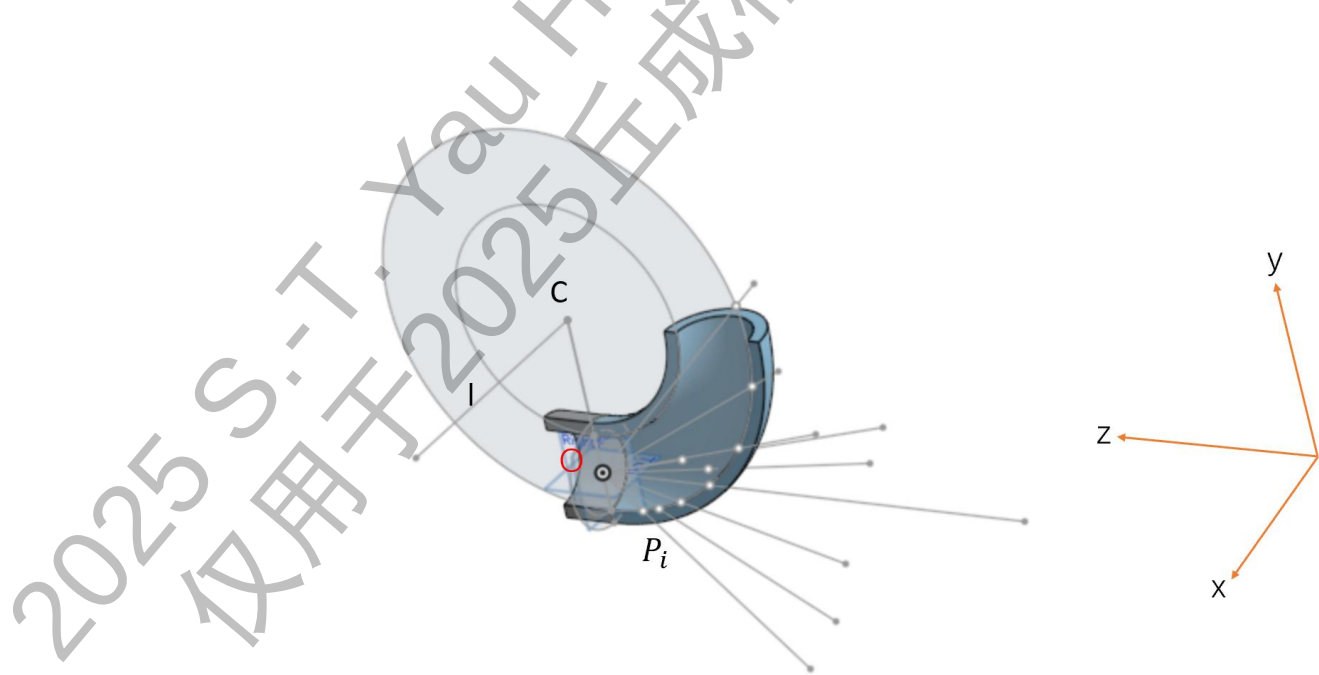


图 3.7 弯管的三维建模

从点 $O$ 出发的射线与管道内壁产生了若干交点，记为点 $P_i$ 。射线用三维向量 $\hat{k}_i d_i$ 表示，其中 $\hat{k}_i$ 为射线的单位矢量， $d_i$ 为线段 $OP_i$ 的长度。

管内壁平面为点 $(x, y, z)$ 的集合，且 $x, y, z$ 满足关系式：

$$(\sqrt{x^2 + y^2} - R)^2 + z^2 = r^2$$

其中，根据模拟管道尺寸，已知 $R = 300, r = 75, l$ 与 $xy$ 平面平行。解方程可得确定管道内壁平面位置的参数：单位向量 $\hat{u}$ ，点 $C$ 。其中单位向量 $\hat{u}$ 用于确定旋转中心直线的方向，点 $C$ 用于确定该直线的位置。得到 $\hat{u}, C$ 信息后，将直线 $l$ 平移至 $xy$ 平面内，并作出过点 $O$ 的垂线，根据垂足坐标计算出垂线与 $x$ 正半轴的夹角。

在实际应用中，为了方便激光束发射方向与算法中的参数对应，坐标原点定为激光发射器的旋转中心，管道检测机器人的正后方规定为 $z$ 正半轴，正右方为 $x$ 正半轴，正上方为 $y$ 正半轴。

### 3.4 控制指令生成与传输

当弯管与检测机器人之间的相对位置确立时，通过控制管道检测机器人转向舵机的朝向与车轮行进圈数，可以使检测机器人与弯管方向匹配，顺利入弯。例如，在图 3.8 中，管道检测机器人的纵向（黄色直线）与管道中心线的行进方向在 $xy$ 平面内的投影（绿色直线）之间存在角度。检测机器人需要以管道轴向为中心，沿绿色箭头方向螺旋运动，直到两条直线重合，完成姿态调整。PC 机依靠 TCP 通信协议，将转向舵机角度、电机转动方向与时间的信息整合成数据包，传输至 ESP32-WROOM-32E。ESP32-WROOM-32E 再将数据包解析为各电信号的参数，通过电路输送给转向舵机与电机，完成自动控制。

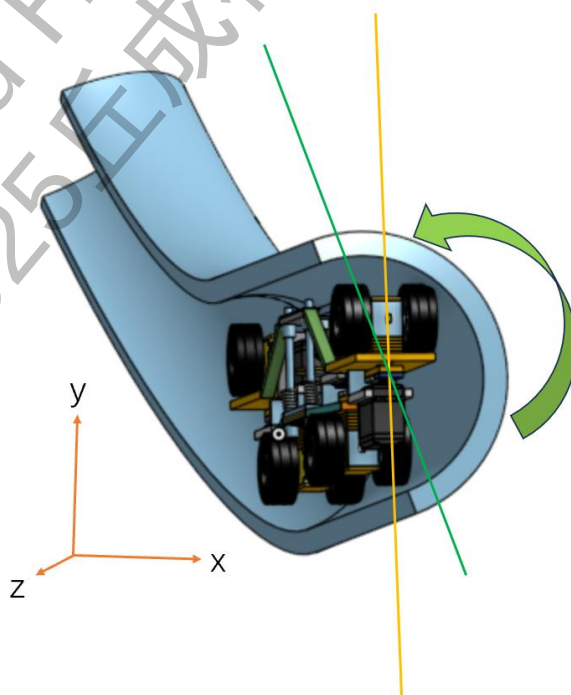


图 3.8 燃气管道内检测机器人的姿态调整

## 第四章 燃气管道内检测机器人性能评估

### 1. 通过性

衡量燃气管道检测机器人的通过性的标准包括检测机器人的尺寸、驱动力以及对管道内径变化的适应能力等。

通过 3D 仿真模型测试,发现该检测机器人能够适应内径在 140mm 至 160mm 范围以内的直管。(图 4.1)

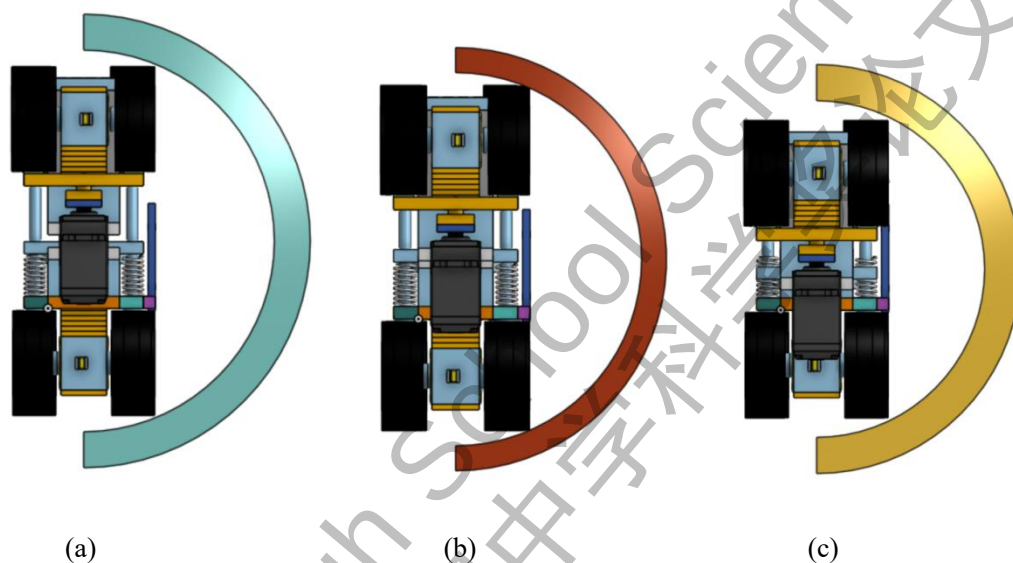


图 4.1 燃气管道内检测机器人在不同管道内径中的通过性测试 (a)内直径为 160mm  
(b)内直径为 150mm (c)内直径为 140mm

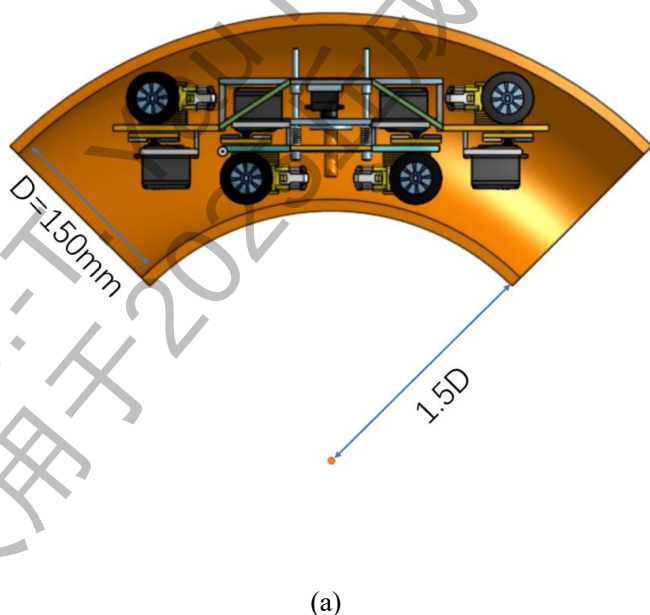


图 4.2 1.5D 弯管通过性验证 (a)3D 建模通过性验证 (b)实物验证

对于弯管，可以通过转弯半径大于等于  $1.5D$  ( $D=150\text{mm}$ ) 的管道。(图 4.2) 对该检测机器人进行力学性能测试，得到结果如表 4.1 所示：

|              |                               |
|--------------|-------------------------------|
| 单个驱动模块最大输出扭矩 | $0.45\text{N} \cdot \text{m}$ |
| 最大总驱动力       | $20.8\text{N}$                |
| 总重力          | $10.8\text{N}$                |
| 最大运行速度       | $4.2\text{cm/s}$              |

表 4.1 燃气管道内检测机器人的运动性能

随后，对该燃气管道检测机器人的爬升能力进行测试（如图 4.3 所示）。结果显示，该检测机器人能够竖直向上通过管道。



图 4.3 竖直爬升测试

## 2. 自主性

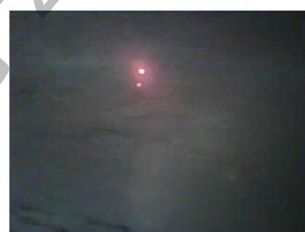
运行图像采集程序，PC 机成功通过 HTTP 协议与 ESP32-CAM 摄像头建立连接，并保存了图 4.4 (a) (b) (c) (d)



(a) frame1



(b) frame2



(c) frame3



(d) frame4

图 4.4 图像采集结果

对 4 张图像分别进行激光点识别与测距，得到表 4.2 数据：

| 图像编号 | 激光点到摄像头的距离<br>/毫米 | 激光射线方向                         |
|------|-------------------|--------------------------------|
| 1    | 375.2             | $0.518\hat{j} - 1.932\hat{k}$  |
| 2    | 222.0             | $-0.776\hat{j} - 2.898\hat{k}$ |
| 3    | 354.2             | $-0.776\hat{i} - 3.864\hat{k}$ |
| 4    | 1189.0            | $1.035\hat{i} - 4.839\hat{k}$  |

表 4.2 空间定位与姿态估计的实验数据

经过计算获得管道位置信息：

旋转直线的单位向量 $\hat{u} = (0.0437, -0.999, 0)$

|                    |                                     |
|--------------------|-------------------------------------|
| 单位向量 $\hat{u}$ 测算值 | $(0.0437, -0.999, 0)$               |
| 单位向量 $\hat{u}$ 实际值 | $(0, 1, 0)$ 或 $(0, -1, 0)$          |
| 点 $C$ 测算值          | $(-22.926, 9.849, -238.639)$        |
| 点 $C$ 实际范围         | $(300, y_C, 0), y_C \in \mathbb{R}$ |

表 4.3 管道位置信息

进一步计算，得出管道旋转中心直线 $l$ 在平面 $z = -238.639$ 内，且 $0.999x + 0.0437y + 22.473 = 0$ ，可得直线 $l$ 经过 $(300, -7372.380, -238.639)$ ，管道中心线在  $xy$  平面内的投影与 $+x$  的夹角约为 $92.5^\circ$ ，与实际值 $90.0^\circ$ 高度吻合。通过分析数据可知，测算出的直线 $l$ 的方向 $\hat{u}$ 与实际数据高度吻合，而参考点 $C$ 的坐标的测算值与实际略有偏差。

重复上述操作 6 次，得到表 4.4 中的测试结果。

| 数据组        | 测算值          | 实际值        | 偏差            |
|------------|--------------|------------|---------------|
| 实验 1       | $92.5^\circ$ | $90^\circ$ | $+2.5^\circ$  |
| 实验 2       | $90.9^\circ$ | $90^\circ$ | $+0.9^\circ$  |
| 实验 3       | $96.8^\circ$ | $90^\circ$ | $+6.8^\circ$  |
| 实验 4       | $-8.4^\circ$ | $0^\circ$  | $-8.4^\circ$  |
| 实验 5       | $2.4^\circ$  | $0^\circ$  | $+2.4^\circ$  |
| 实验 6       | $11.7^\circ$ | $0^\circ$  | $+11.7^\circ$ |
| 实验 7       | $5.4^\circ$  | $0^\circ$  | $5.4^\circ$   |
| 实验 1-3 平均值 | $93.4^\circ$ | $90^\circ$ | $+3.4^\circ$  |
| 实验 4-7 平均值 | $2.8^\circ$  | $0^\circ$  | $+2.8^\circ$  |

表 4.4 管道位置的测算值与实际值的偏差

据此测试数据，该燃气管道检测机器人对弯管中心线方向的识别判断能力较强，大多数测算偏差都在 $10^\circ$ 以内，最大测算偏差仅为 $11.7^\circ$ ，具备良好自主性。

### 3. 稳定性

本研究主要通过衡量设备运行时的前后一致性来评估燃气管道检测机器人的稳定性。在此次实验中，对于每一个控制杆位置都进行了 10 次测试，使用 ESP32-WROOM-32E 单片机测算 PWM 信号高电平的持续时长并将其与控制杆位置对应，绘制出 PWM 高电平时长与遥控器控制杆被推动距离的关系图（图

4.5)。

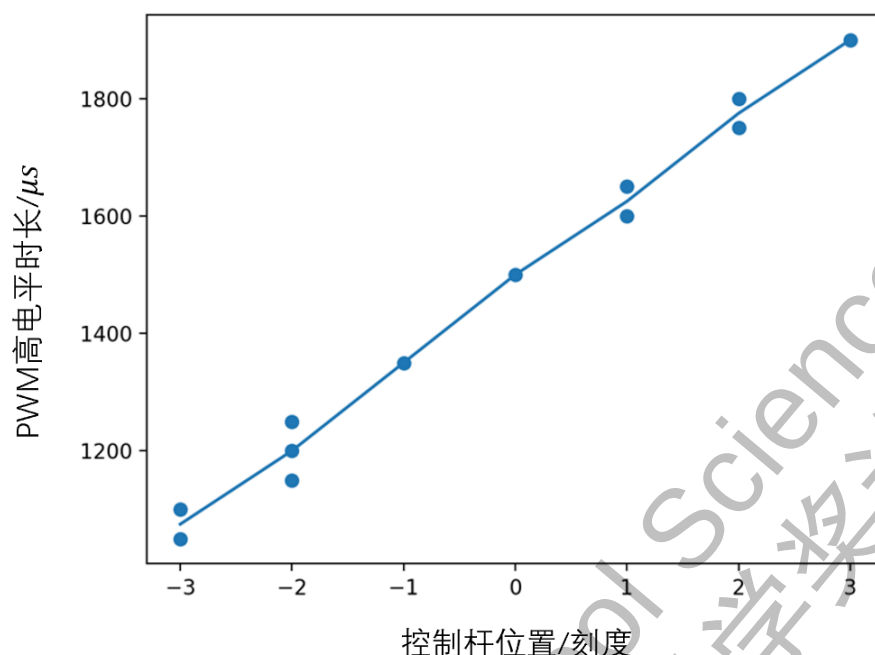


图 4.5 PWM 高电平时长与遥控器控制杆所在位置的关系

由图可见，PWM 信号的高电平时长基本与遥控器控制杆推动的距离成线性关系。这验证了控制系统的设计所依赖的理论基础。此外，PWM 高电平时长变化范围均在 $\pm 50\mu s$ 以内，信号稳定。由此可见，该遥控信号接收器运行状态良好，稳定性较高。结合在第三章中提及的电机空载转速与输入 PWM 高电平时长之间的关系，操作者能够对检测机器人的运行速度进行近似线性的操控，因此手动控制系统具备较高的稳定性。

## 4. 结论

通过以上仿真实验测试，可以定量地描述该燃气内管道检测机器人的性能。根据上述实验可知，该检测机器人能够产生约等于自身重力两倍的推动力，通过内直径为  $150\text{mm} \pm 10\text{mm}$  的直管与  $1.5D$  的弯管，并完成竖直向上的运动；PC 机可以与摄像头建立连接并获取图像，识别到图像中的激光点，进行测距，较为精准地获取检测机器人相对于弯管的位置、姿态等信息，典型偏差在 $\pm 10^\circ$ 以内；遥控信号接收器工作状态稳定，十分精准地解析了来自遥控器的电磁信号，产生的 PWM 信号高电平时长与控制杆位置基本成线性关系，偏差均控制在 $\pm 50\mu s$ 以内。由此可见，该检测机器人具备较强的通过性、稳定性与良好的自主性。

## 第五章 总结与评价

### 1. 本文内容总结

在本文中，基于现实的需求以及学术界的研究背景与成果，一种新型的燃气管道内检测机器人设计方案被提出，并从机械设计、电气系统、控制系统与计算机视觉导航等方面详细介绍其构造布局方式和设计原理。随后，通过模拟实验证明了该检测机器人的综合性能良好，总质量小、能耗低，具备较强的通过性、高稳定性与一定的自主性。本研究的主要创新点如下：

1. 在机械设计方面，本文提出了单节轮式燃气管道内检测机器人的设计方案，较大程度地克服了传统车厢式管道检测机器人通过性较弱、控制系统繁杂的弱点。此外，压缩板的设计使得车轮对管壁的压力可控，进而在提供足够推进力的同时尽量减少滚动摩擦力，增加机械效率。
2. 在手动控制系统中，通过理论预测与实验校正的方法基本实现了线性的转速控制，使得操作者通过遥控器推杆能够更加精准地控制管道检测机器人的移动速度。
3. 在自动控制系统中，通过对激光点进行识别与测距，可以得到弯管中心线的行进方向，进而指挥检测机器人运动到指定位置，以正确的姿势入弯，增强了其通过性与自主性，最终实现传感、驱动、控制的一体化。

因此，该燃气管道内检测机器人传感系统、运动系统、控制系统较为完备，具备良好性能，为燃气管道内部检测任务提供了技术基础。

### 2. 对研究的反思与评价

在本研究中所设计的机器人成功实现了通过直管、弯管和竖直爬升的功能，具备较强通过性、一定的自主性与稳定性，综合性能良好。

然而，由于管道直径较小、各机械结构尺寸较大等限制，整个检测机器人的结构布局过于紧凑，使得后期进一步的检测设备装载、模块更新安装等优化操作比较难以实施。因此，如果能够使原有的机械结构与电气系统更加集成化，使机器人整体设计更加轻量化，那么该检测机器人的性能将得到进一步的提升。

受限于较为单一的实验管道，计算机视觉的样本容量较小，难以对其进行全方面、真实场景下的评估。同时，由于摄像头的分辨率不高，对激光点的测距有一定误差，从而可能对管道中心线行进方向产生误判，减弱该检测机器人的运动性能。此外，该检测机器人的图像传输与自动控制时的信号传输均基于 HTTP 通信协议，在实际应用中，考虑到金属管道对信号传输的屏蔽与干扰作用，信号传输将受到较大限制。因此，未来仍需对信号传输方式进行优化。

## 参考文献

- [1] 郝帅与孙婷婷, 试论城镇燃气管道安全运行智能化监测系统. 当代化工研究, 2022(09): 第99-101页.
- [2] 戴贵文, 城镇燃气管网安全运行问题及其对策. 建筑工程技术与设计, 2019(30).
- [3] Zhao, W.; Zhang, L.; Kim, J. Design and Analysis of Independently Adjustable Large In-Pipe Robot for Long-Distance Pipeline. *Appl. Sci* 2020, 10, 3637
- [4] Atsushi Kakogawa; Shugen Ma; Shigeo Hirose. An In-pipe Robot with Underactuated Parallelgram Crawler Modules. 2014 IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA)
- [5] Kaned Thung-Od, Kiattisin Kanjanawanishkul, Thavida Maneewarn, et al. An In-Pipe Inspection Robot with Permanent Magnets and Omnidirectional Wheels: Design and Implementation. *Appl. Sci.* 2022, 12 (3), 1226
- [6] Xie, Q.; Cui, S; Cheng, P.; Liu, Q, et al. Design of an In-Pipe Robot Coupled With Multiple Cams. *IEEE* 2023, Volume 11, 2169-3536
- [7] Damien Chablat, Swaminath Venkateswaran, Frederic Boyer. Mechanical Design Optimization of a Piping Inspection Robot. 28th CIRP Design Conference, May 2018, Nantes, France
- [8] Yun-Jong Kim, Kyung-Hyun Yoon and Young-Woo Park. Development of the Inpipe Robot for Various Sizes. IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Suntec Convention and Exhibition Center, 2009.
- [9] Ankit Nayak and S. K. Pradhan. Design of a New In-Pipe Inspection Robot. 12th GLOBAL CONGRESS ON MANUFACTURING AND MANAGEMENT, GCM 2014
- [10] Rusu, C.; Tatar, M.O. Adapting Mechanisms for In-Pipe Inspection Robots: A Review. *MDPI* 2022, 12, 6191
- [11] Iszmir Ismail, Adzly Anuar, Khairul Sahari, et al. Development of in-pipe inspection robot: A review. 2012 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology (STUDENT)
- [12] H.O. Lim, T. Ohki. Development of Pipe Inspection Robot. ICCAS SICE 2009. 2009, pp. 5717 - 5721.

## 致谢

感谢邵珠峰老师与王艺平老师给予的无偿指导，对我的论文提出宝贵的修改意见。邵珠峰老师针对我的论文，提出了翔实的布局方案，并向我细致讲解了摄像头模块的工作原理与工程思维。王艺平老师作为校内班主任兼高级科学研修课程的辅导教师，向我传授了文献阅读、撰写论文的基本知识与注意事项，为我的研究计划提出了悉心建议，并对我的论文初稿细心审阅，提出了宝贵的改进建议，帮助我突出本研究的创新点。

同时，也感谢邵老师实验室的曾沛崑学长，向我传授机械设计、单片机编程、电气与控制系统等知识，奠定了我开启机器人设计技能的基础；让我接触到了多样的机械结构，向我展示 CAD 建模软件的使用方法，拓展了我的视野；也为我在 3D 打印方面答疑解惑，启发我发现旧版设计中的缺陷，并鼓励我对整体结构进行改良。感谢同在邵老师实验室的薛雨泉同学，向我慷慨提供图像传输、计算机视觉的源代码，帮助我理解其工作原理。

感谢人大附中科技俱乐部为我提供的科研活动平台，让我接触了其他同学的研究方向、内容与方法，与同学互相交流鼓励，取长补短。

本论文作者负责燃气管道内检测机器人的机械设计与组装、电路的设计与连接、控制系统的程序编写、实验测试和数据获取以及本论文的初稿撰写。

在设计之初，由于缺乏相关经验，使用了规格不匹配的舵机，导致机器人无法顺利运转。同时由于疏忽，转向时会与上下层主体结构产生干涉，故需要重新开始设计，设计进度受到了一定耽搁。再次开始设计时，着重关注了机械结构之间可能存在的干涉故障，并进行了 3D 建模的仿真模拟，确保相同错误不会再次发生。