



山西大学  
SHANXI UNIVERSITY

## 2023 届硕士学位论文

# 基于树莓派的温度巡检机器人 设计与实现

作者姓名 孔欣茹

指导教师 王莹 讲师

学科专业 通信工程

研究方向 传感器与集成测量系统

培养单位 物理电子工程学院

学习年限 2020 年 9 月至 2023 年 6 月

二〇二三年六月

山西大学  
2023 届硕士学位论文

# 基于树莓派的温度巡检机器人 设计与实现

作者姓名 孔欣茹  
指导教师 王 莹 讲 师  
学科专业 通信工程  
研究方向 传感器与集成测量系统  
培养单位 物理电子工程学院  
学习年限 2020 年 9 月至 2023 年 6 月

二〇二三年六月

**Thesis for Master's degree, Shanxi University, 2023**

**Design and Implementation of a Temperature Inspection  
Robot Based on Raspberry Pi**

Student Name	Xin-ru Kong
Supervisor	Lecturer. Ying Wang
Major	Communication Engineering
Specialty	Sensors and Integrated Measurement Systems
Department	School of Physics and Electronic Engineering
Research Duration	2020.09-2023.06

June, 2023

## 中 文 摘 要

国家正进行电力体制的改革，变电站作为电网核心，保证其安全运行是非常重要的工作内容。变电站的日常巡检工作趋向于自动化和智能化，机器人技术的进步和革新使其成为变电站巡检这一领域的重要协助工具。巡检机器人的功能在于监测设备的运行情况，能够实现自主导航并将巡检的数据上传管理中心，解决人工巡检方式中存在的效率低、劳动强度大和记录不规范导致数据查询困难等问题。本文针对上述传统巡检过程中存在的问题，设计了一款基于树莓派的变电站温度巡检机器人，提出一种利用二维码标签实现设备自主定位的方法，并进行测温和数据存储，提高数据的准确性和完整性，课题具体研究内容包括以下方面：

首先，通过总结巡检机器人的国内外发展现状，提出了本文中所设计的机器人总体设计方案，对各部分进行简要阐述，介绍了机器人的关键技术功能。

其次，对机器人的硬件部分进行技术性分析，设计机械结构，对各部分进行硬件选型并介绍技术指标。系统的主控芯片采用基于 ARM 的微型电脑主板树莓派 4B，在组件设计中，配置摄像头模块、温度传感器、电机驱动模块、舵机驱动模块、超声波传感器和红外传感器等分别和树莓派连接搭建实验平台。

再次，对机器人的软件部分进行介绍，阐述软件系统结构和技术实现方法，运用 Python 完成机器人的底层控制和智能避障等功能的程序编写，运用 HTML 语言编写用户界面。系统结合 OpenCV 图像处理库及 Pyzbar 算法实现变电站设备的定位、测温和数据录入等功能。

然后，对巡检机器人进行功能实验测试，分别为远程控制功能测试、智能避障测试、视频回传测试、定位测温及数据存储测试等，并对其进行分析，验证各部分运行的可行性和稳定性。

最后，对机器人在变电站的实际工作环境进行地图建模，设计两种工作场景下的路径规划算法，作出相关改进，并进行仿真测试验证算法的可行性。

本文中的机器人经过测试达到预期效果，能够减轻变电站工作人员的劳动强度，改进的路径规划算法使得巡检路径缩短，能够让工作更加高效和便捷。

**关键词：**巡检机器人；树莓派；二维码识别；红外测温；路径规划

## ABSTRACT

The country is undergoing a reform of the power system, and as the core of the power grid, ensuring the safe operation of substations is a very important task. The daily inspection work of substations tends to be automated and intelligent, and the progress and innovation of robot technology have made it an important assistance tool in the field of substation inspection. The function of inspection robots is to monitor the operation of equipment, achieve autonomous navigation, and upload inspection data to the management center, solving the problems of low efficiency, high labor intensity, and difficulty in data query caused by non-standard records in manual inspection methods. This article proposes a substation temperature inspection robot based on Raspberry Pi to address the issues in the traditional inspection process mentioned above. It proposes a method of using QR code labels to achieve device autonomous positioning, temperature measurement, and data storage to improve data accuracy and completeness. The specific research content of the project includes the following aspects:

Firstly, by summarizing the current development status of inspection robots at home and abroad, the overall design scheme of the robot designed in this article is proposed, and each part is briefly explained, introducing the key technical functions of the robot.

Secondly, conduct technical analysis on the hardware part of the robot, design mechanical structures, select hardware types for each part, and introduce technical indicators. The main control chip of the system adopts the ARM based microcomputer motherboard Raspberry Pi 4B. In the component design, the camera module, temperature sensor, motor drive module, servo drive module, ultrasonic sensor, and infrared sensor are respectively connected to Raspberry Pi to build an experimental platform.

Once again, introduce the software part of the robot, explain the software system structure and technical implementation methods, use Python to complete the programming of the robot's low-level control and intelligent obstacle avoidance functions, and use HTML language to write the user interface. The system combines OpenCV image processing library and Pyzbar algorithm to achieve functions such as positioning, temperature measurement, and data input of substation equipment.

Then, functional experiments were conducted on the inspection robot, including

remote control function testing, intelligent obstacle avoidance testing, video feedback testing, positioning temperature measurement and data storage testing, and analysis was conducted to verify the feasibility and stability of each part's operation.

Finally, map modeling of the actual working environment of the robot in the substation, designing path planning algorithms for two working scenarios, making relevant improvements, and conducting simulation tests to verify the feasibility of the algorithms.

The robot in this article has been tested and achieved the expected effect, which can reduce the labor intensity of substation workers. The improved path planning algorithm shortens the inspection path, making work more efficient and convenient.

**Key words:** inspection robot; Raspberry Pi; QR code recognition; infrared temperature measurement; path planning

## 缩 略 语

RFID	Radio Frequency Identification	射频识别
GPIO	General-purpose input/output	通用输入/输出
HTML	Hyper Text Mark-up Language	超文本标记语言
OpenCV	Open Source Computer Vision Library	开源的计算机视觉库
CSI	CMOS Sensor Interface	相机串行接口
PWM	Pulse Width Modulation	脉冲宽度调制
SMBus	System Management Bus	系统管理总线
IDE	Integrated Development Environment	集成开发环境
CSS	Cascading Style Sheets	层叠样式表
BOM	Browser Object Model	浏览器对象模型
DOM	Document Object Model	文档对象模型
HTTP	Hyper Text Transfer Protocol	超文本传输协议
TCP	Transmission Control Protocol	传输控制协议
WSGI	Web Server Gate Interface	Web 服务器网关接口
UPS	United Parcel Service	美国联合包裹运送服务公司
QR	Quick Response	快速响应
BSD	Berkeley Software Distribution	伯克利软件套件
CSV	Comma-Separate Values	字符分隔值
GIS	GasInsulatedmetal.enclosedSwitchgear	气体绝缘金属封闭开关设备

# 目 录

1 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 巡检机器人国内外研究现状 .....	2
1.2.1 国外研究现状.....	2
1.2.2 国内研究现状.....	3
1.3 主要研究内容及章节安排 .....	5
2 巡检机器人硬件设计 .....	7
2.1 机器人硬件设计总述.....	7
2.2 树莓派简介 .....	8
2.3 机器人系统.....	10
2.3.1 电机模块.....	10
2.3.2 避障功能模块.....	11
2.3.3 电源模块.....	12
2.3.4 摄像头云台.....	13
2.4 温度传感器模块.....	15
2.5 本章小结.....	16
3 巡检机器人软件设计 .....	17
3.1 机器人软件设计总述.....	17
3.2 系统开发环境搭建.....	17
3.3 电机驱动.....	19
3.4 舵机驱动.....	21
3.5 视频回传和远程控制.....	21
3.6 避障功能.....	25
3.7 定位、测温和存储功能.....	26
3.7.1 定位方法.....	26
3.7.2 测温功能.....	30
3.7.3 存储功能.....	33
3.7.4 总体流程.....	34
3.8 本章小结.....	35
4 系统搭建与测试 .....	37
4.1 概述.....	37
4.2 机器人移动和摄像头云台测试 .....	37
4.3 定位和温度测试.....	41
4.4 本章小结.....	42

5 巡检机器人路径规划算法研究 .....	43
5.1 地图构建.....	43
5.1.1 常用地图建模方法.....	43
5.1.2 环境建模.....	43
5.2 路径规划算法.....	45
5.2.1 单目标任务巡检算法.....	45
5.2.2 多目标任务巡检算法.....	47
5.3 路径规划算法性能测试.....	50
5.3.1 单目标任务算法仿真结果.....	50
5.3.2 多目标任务算法仿真结果.....	52
5.4 本章小结.....	54
6 总结与展望.....	55
6.1 总结.....	55
6.2 展望.....	56
参考文献.....	57

# 1 绪论

## 1.1 研究背景及意义

近年来，城市发展步伐的加快和变电站建设的日益增多使电力系统的安全问题受到广泛关注。在电力工业向大容量与大机组方向发展过程中，供电和输电能力不断加强，故障发生概率也随之增大，变电站作为电力系统中完成调整电压、接受电能、控制电力流向等功能的电力设施，经济价值重大<sup>[1-3]</sup>。因此变电站要加强日常的安全维护，其整体控制管理能力也应得到相应提高。

据统计，电力系统中设备出现异常很多都表现为热故障，可能会导致事故<sup>[4-5]</sup>。例如 2020 年 11 月 16 日，武汉东湖高新区雄楚大道 307 号关山 220kV 变电站起火，造成光谷地区多个小区停电，部分居民困在电梯，对人民日常生活带来诸多不便，如图 1-1 所示。



图 1-1 武汉变电站起火

Fig. 1-1 Wuhan substation caught fire

变电站巡检工作具有高危险性等特点，会有一定的安全隐患，而且人工巡检存在以下缺点：

- (1) 人工巡检工作量大，人员辛苦。巡检结果受人的主观影响，可能会误读或漏读测量仪表的数值；
- (2) 人工巡检中获取的信息在传送环节存在延迟，且工作人员安排情况难以达到预期；
- (3) 人工巡检的数据一般都是纸质记录，不便于查询历史记录且保存难度大；
- (4) 人工巡检安全问题得不到保障。变电站情况复杂，工作人员长期工作在大电流、强磁场环境中容易产生健康问题；

(5) 人工巡检运维成本高。变电站巡检工作的人员配备较多，运营成本较高。

传统的人工巡检方式已经失去变电站建设初期的优势，机器辅助或者代替人工巡检已经成为热门研究方向并进入规模化推广应用阶段<sup>[6-7]</sup>。变电站巡检机器人的应用可以减少人员的配置，解放劳动力，保证人员安全，提高变电站巡检过程的可靠性。

在管理逐渐精益化的社会背景之下，电力系统在运用巡检机器人进行相关工作逐渐变成常态化机制。电力行业的管理工作结合了通讯、智能控制和信号处理等技术，可进一步提升其自动化程度<sup>[8]</sup>，提升输配电的安全性。技术的不断发展为变电站的智能化注入动力，对我国的经济发展有促进作用。

## 1.2 巡检机器人国内外研究现状

随着科学技术的发展，机器人应用于各种场合，致力于解放劳动力和提升工作效率，为人类的社会生产活动提供很多便利。变电站巡检机器人越来越受到电力行业及相关行业的关注，将现有的技术和巡检机器人结合，对变电站进行设备检查、数据传送和信息存储，使电力系统真正实现决策智能和管理智能。

### 1.2.1 国外研究现状

二十世纪五十年代，一种可编程移动机器人在美国问世，机器人的研究工作进入起步阶段<sup>[9]</sup>。随着机器人功能的不断升级，其被广泛应用于包括变电站巡检工作在内的诸多场景中。世界上最早的巡检机器人诞生于日本，电力公司和企业共同制造出一款轨道移动式机器人，由于技术等因素，完成小型测试后停止研发工作<sup>[10]</sup>，如图 1-2 所示。



图 1-2 日本的轨道移动式机器人

Fig. 1-2 Orbital mobile robot in Japan

2000 年，加拿大魁北克水电研究所提出配备红外热成像仪和可见光图像采集系

系统的机器人，可以检测高温点和潜在故障，后续开发的机器人 LineScout 可以沿轨道运行，此系统配置有摄像头的机械臂以对线路组件进行巡视，机器人如图 1-3 所示<sup>[11]</sup>。



图 1-3 加拿大设计的巡检机器人

Fig. 1-3 Patrol robot designed in Canada

2008 年，巴西的圣保罗大学研发了一款空中轨道巡检机器人，该系统能够在预先安装的轨道上对变电站内的固定观测点进行温度检测，自动接收相关信息，受气候影响较大<sup>[12-13]</sup>。

2012 年，梅西大学和新西兰电网公司共同研制一款有防碰撞功能的巡检机器人，其搭载超声波且能完成高清的视频回传工作，以实现对变电站整个地形的巡查<sup>[14]</sup>。

2017 年，韩国科学技术研究院机器人研究中心设计了如图 1-4 所示的输电线路巡检系统，并提出一种基于单目摄像机的障碍物识别和距离估计方法，以避开输电线上或周围的障碍物<sup>[15]</sup>。



图 1-4 韩国的输电线路巡检机器人

Fig. 1-4 South Korea's transmission line inspection robot

### 1.2.2 国内研究现状

国内的变电站巡检机器人研究要晚于其他国家，因此发展水平存在一定差距，但是伴随我国科学技术的不断完善和革新，电力行业的各项技术也在发展，科研人

员正在投入大量精力研发变电站巡检机器人。

上世纪九十年代，山东鲁能智能技术有限公司和山东电力公司开始进行变电站巡检机器人的相关制造工作，2004年，完成第一个样机的制造，山东电力公司在第一代样机的基础上不断完善开发出第二代到第五代的机器人<sup>[16-17]</sup>。2012年成都慧拓智能巡检机器人在郑州某变电站投放运行，该机器人通过对仪表等设备的处理分析来判断变电站的运行状态，并对异常情况发出警报<sup>[18]</sup>，如图1-5所示。2013年，肖鹏和郭睿等人设计一种巡检机器人，并针对目前变电站巡检机器人所采用的磁导和射频识别（Radio Frequency Identification, RFID）定位系统存在的不足，设计了一种激光导航方法使其巡检功能更加完善，如图1-6所示<sup>[19]</sup>。



图1-5 成都慧拓变电站巡检机器人

Fig. 1-5 Patrol robot of Chengdu

Huituo Substation



图1-6 带有激光导航功能的巡检机器人

Fig. 1-6 Patrol robot with laser

navigation function

2015年，哈尔滨工业大学和深圳市精细自动化机械有限公司共同研发基于超宽带无线定位的巡检机器人，运用加权K近邻的定位算法使其定位更加精准<sup>[20]</sup>，如图1-7所示。



图1-7 基于超宽带无线定位的巡检机器人

Fig. 1-7 Patrol robot based on ultra-wideband wireless positioning

2018年，广东电网和中国航空工业集团公司共同研发了一套变电站智能巡检机器人，从本体结构、充电系统、通信方式和本地监控后台等方面介绍了系统的结构和设计<sup>[21]</sup>，如图1-8所示。2020年，赵鑫和彭志远等人设计一款巡检机器人<sup>[22]</sup>，应

用红外成像技术进行设备故障检测以及应用支持向量机进行故障设备的红外图像识别，如图 1-9 所示。2021 年，于志浩设计了一款采用惯性测量单元和 GPS 进行数据融合的方式设计里程计的变电站自主导航机器人<sup>[23]</sup>。



图 1-8 广东电网和中国航空工业  
集团研发的机器人



图 1-9 应用红外成像  
技术的机器人

Fig. 1-8 Robots developed by Guangdong  
Power Grid and Aviation Industry Corporation of China

Fig. 1-9 Robot with infrared  
imaging technology

综合以上研究现状，国内和国外的学者都在不断进行变电站巡检机器人的研发和改进，从机械结构、运动规划、非接触式检测、图像处理和多传感器融合等多个技术维度对巡检机器人展开探索，使其能更加适应于变电站内复杂的工作环境。

### 1.3 主要研究内容及章节安排

本文的主要研究对象是变电站巡检机器人，通过对国内外的研究现状总结和分析，发现目前的机器人结构较为复杂且庞大，自主导航过程中缺乏灵活度可能会导致无法在突发状况下躲避障碍物并及时调整线路，以及对变电站中高压开关柜的温度测量功能不够简便和完整。因此本文主要目的是研制出一款适应于变电站工作环境中的机器人系统，其具备回传监控图像、远程遥控和路径规划等功能。针对目前人工巡检中存在的问题创新性地提出一种基于二维码标签的定位方法并对高压开关柜进行温度测量，将获得的位置信息和温度信息实时上传反馈，同时将测量时间、测温地点和温度数值逐行保存，便于工作人员后续按照时间和地点对设备进行情况查询，从而推动变电站温度巡检的智能化。通过对变电站环境分析，为其设计两种巡检工作场景下的路径规划方法。

本论文共分为六章，各个章节的内容如下：

第一章：绪论。叙述当前变电站巡检工作的弊端，简要概括变电站巡检机器人的国内外发展现状，阐述课题的研究意义和主要研究内容，最后介绍本文的章节内

容安排和组织结构。

第二章：巡检机器人硬件设计。通过分析整体系统的需求，给出机器人的硬件设计方案，进一步明确巡检机器人的总体架构，详细介绍系统的各部分硬件组成，包括机器人本体结构搭建，各部分电路设计等。

第三章：巡检机器人软件设计。完成软件部分的设计，电机、舵机驱动程序，远程遥控和智能避障等程序编写，针对高压开关柜长期工作带来的高温现象，设计对其进行自动定位测温的功能，并将以上数据实时上传并存储，以便工作人员后续根据时间地点对高压开关柜的温度值进行查询。

第四章：系统搭建与测试。将设计好的机器人架构完成实体搭建以及软件程序编写，并对样机的各方面功能进行结果测试，从而验证巡检机器人的可行性。

第五章：巡检机器人路径规划算法研究。将变电站实际环境进行简化处理并栅格化，根据巡检任务需求选用合适的路径规划算法，并对其作出改进，将算法载入地图模型进行仿真测试，验证算法的先进性。

第六章：总结与展望。归纳本文中的主要工作内容，并指出其中的不足和需要改进的环节，以期望在后续工作中进行完善。

## 2 巡检机器人硬件设计

### 2.1 机器人硬件设计总述

硬件系统是软件和算法设计的基础，根据变电站温度巡检机器人的整体目标要求，对硬件部分进行设计，主要包含各硬件器件的选型和部署，以及搭建数据通信系统。变电站的占地面积大，为扩大其网络的覆盖程度，可通过设置路由器和无线节点来实现无线局域网络覆盖变电站全区域。巡检机器人即可通过无线与终端设备进行数据交换等，机器人的系统框图如图 2-1 所示。按照系统需求框架，硬件部分主要分为智能机器人、定位测温端和远程控制端。

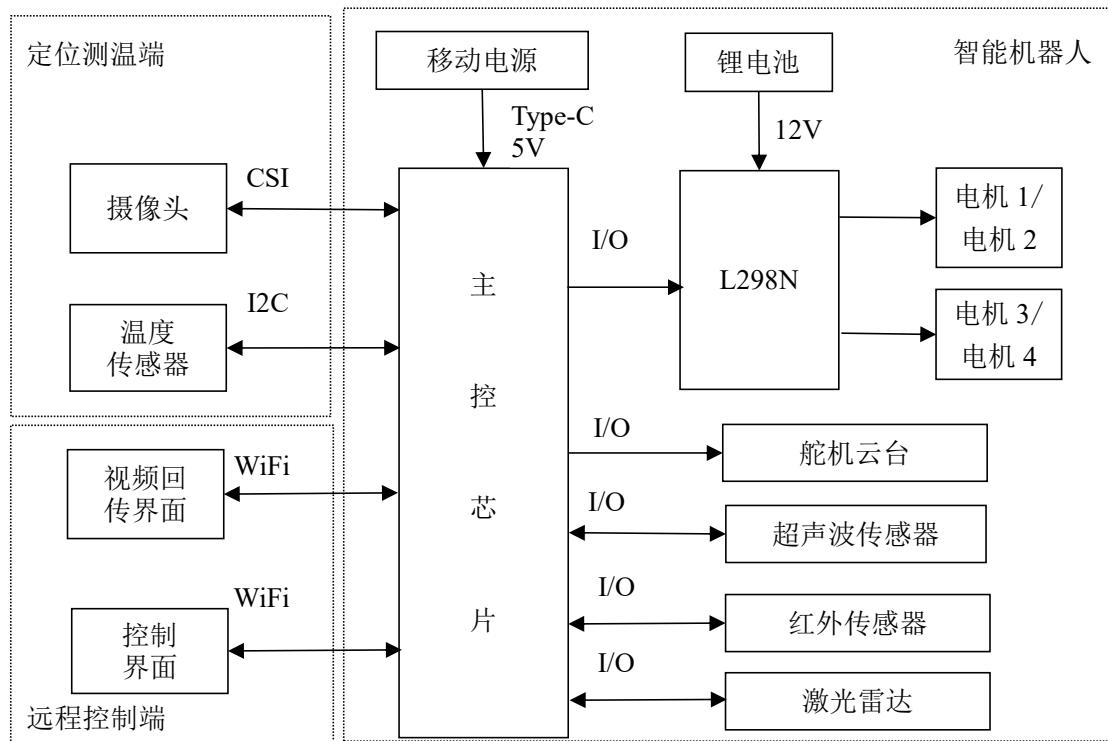


图 2-1 系统框图

Fig. 2-1 System block diagram

智能机器人部分的电源模块，即锂电池和移动电源共同为整个系统提供电能保障；机器人底盘、主控芯片、电机及其驱动构成基础部分支撑系统后续搭建；配置舵机云台为摄像头扩大视野范围；红外传感器和超声波传感器为智能避障部分提供硬件支撑。电机驱动模块、舵机云台、超声波传感器和红外传感器均与主控芯片的通用输入/输出（General-purpose input/output, GPIO）口相连。远程控制的图像传输界面为远程监控设备，机器人传回的视频图像显示在此设备上；控制界面为遥控端，

其与机器人建立通信后，可远程发出控制指令；视频回传界面和远程控制界面均通过 WiFi 与机器人进行信息交互。定位测温部分的摄像头与主控芯片连接完成视频拍摄，后续搭载图像处理技术进行定位；温度传感器与主控芯片连接通过 I2C 接口进行通信。

## 2.2 树莓派简介

巡检机器人的控制系统处理器需要具备较好的图像处理能力，目前符合需求的设备主要有四类：基于 DSP、基于图像采集卡与 PC 机、基于 FPGA 以及基于 ARM 芯片的图像处理<sup>[24]</sup>。各设备性能如表 2-1 所示，根据实验需求和对比，本系统选择搭载 ARM 处理器的树莓派。

表 2-1 图像处理设备性能比较

Tab. 2-1 Performance comparison of image processing equipment

设备	性能
基于 DSP	运算能力较强，不能在其芯片上安装 Linux 系统，不便于利用 ROS 的功能接口设计开发其他功能
基于图像采集卡和 PC 机	作为图像采集部分和处理部分的接口，需依赖外部 PC、影响移动机器人的体积
基于 FPGA	可编程器件门电路数种类丰富、允许硬件层面的编程、支持高效率的并行处理机制、芯片成本很高
基于 ARM	具备控制大量外设的能力，寻址方式灵活，指令执行速度快，稳定性也在提高

树莓派是一种以 SD 卡为内存硬盘的微型计算机，它具有传统嵌入式系统的低功耗和便携性等优点，同时功能更加强大，可以完成更多复杂的运算工作。树莓派设有以太网端口可连接到网络，可通过有线网和无线网两种方式进行通信，具有相机串行接口（CMOS Sensor Interface，CSI）等，且提供 40 个 GPIO 口用于连接传感器等不同组件<sup>[25-26]</sup>。本系统选用树莓派 4B 开发板，性能相较于树莓派 3B+ 有显著提升，其有众多外设接口，且支持多样化的系统，例如：Raspbian、Ubuntu-MATA、Win10-IoT 等<sup>[27]</sup>。树莓派 4B 实物图及其引脚图如图 2-2 和图 2-3 所示。主控芯片树莓派的接口资源和 GPIO 管脚与各部件的连接分配如表 2-2 所示。

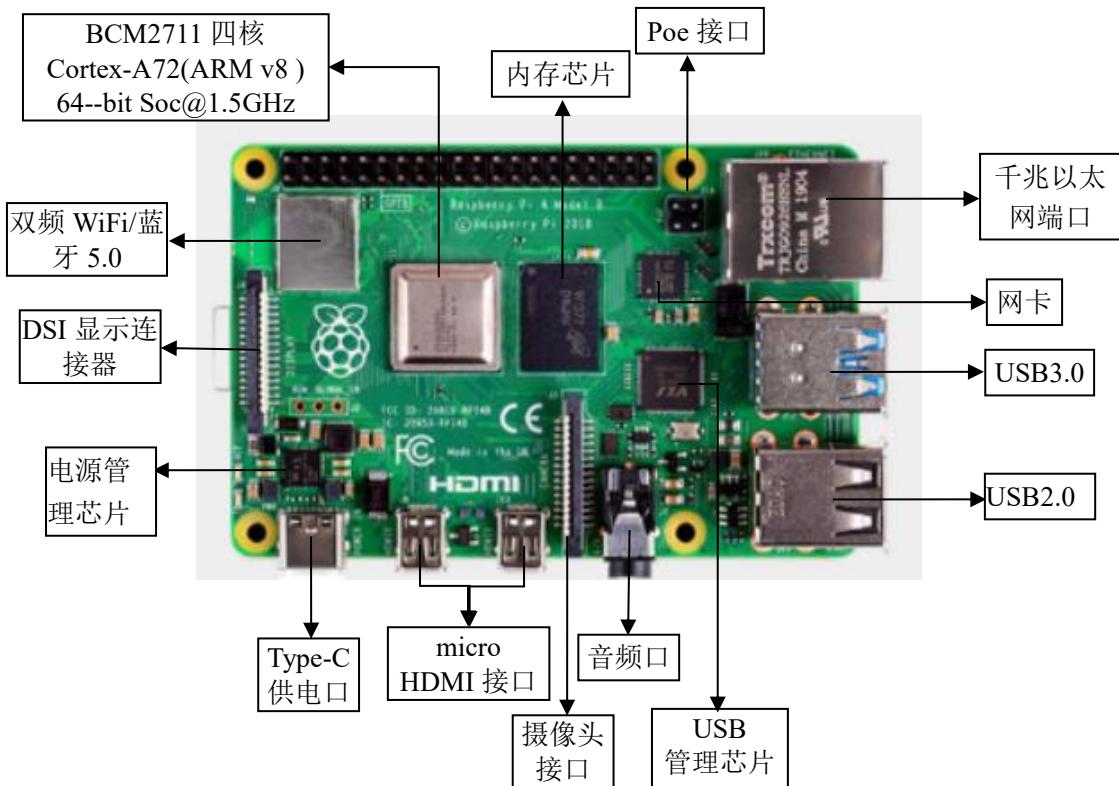


图 2-2 树莓派 4B 实物图

Fig. 2-2 Physical picture of Raspberry Pi 4B

wiringPi 编码	BCM 编码	功能名	物理引脚 BOARD 编码	功能名	BCM 编码	wiringPi 编码
		3.3V	1 2	5V		
8	2	SDA.1	3 4	5V		
9	3	SCL.1	5 6	GND		
7	4	GPIO.7	7 8	TXD	14	15
		GND	9 10	RXD	15	16
0	17	GPIO.0	11 12	GPIO.1	18	1
2	27	GPIO.2	13 14	GND		
3	22	GPIO.3	15 16	GPIO.4	23	4
		3.3V	17 18	GPIO.5	24	5
12	10	MOSI	19 20	GND		
13	9	MISO	21 22	GPIO.6	25	6
14	11	SCLK	23 24	CE0	8	10
		GND	25 26	CE1	7	11
30	0	SDA.0	27 28	SCL.0	1	31
21	5	GPIO.21	29 30	GND		
22	6	GPIO.22	31 32	GPIO.26	12	26
23	13	GPIO.23	33 34	GND		
24	19	GPIO.24	35 36	GPIO.27	16	27
25	26	GPIO.25	37 38	GPIO.28	20	28
		GND	39 40	GPIO.29	21	29

图 2-3 树莓派 4B 引脚图

Fig. 2-3 Raspberry Pi 4B pin diagram

表 2-2 树莓派与各模块接口分配

Tab. 2-2 Interface allocation between Raspberry Pi and each module

元器件	接口类型	占用引脚/接口
电机驱动	GPIO	GPIO11-GPIO13、GPIO15-16、GPIO18
舵机驱动	GPIO	GPIO8、GPIO10
超声波传感器	GPIO	GPIO35、GPIO37
红外传感器	GPIO	GPIO36、GPIO40
温度传感器	I2C	GPIO3、GPIO5
摄像头	CSI	CSI 接口

## 2.3 机器人系统

系统主体是轮式机器人，主要结构包括底盘、四个车轮、四个直流电机、电机驱动板、超声波传感器和红外传感器等。底盘是承担机器人系统整体质量的重要组成部分，是实现运动的基础；直流电机、车轮和电机驱动完成巡检机器人的前进后退等过程；超声波传感器和红外传感器与树莓派连接实现机器人的智能避障功能。

### 2.3.1 电机模块

机器人的驱动方式为四轮驱动，电机驱动型号为 L298N，实物如图 2-4 所示，属于 H 桥集成电路，可以驱动大功率的直流电机，具有过热自断和反馈检测功能<sup>[28-29]</sup>。电机驱动电路如图 2-5 所示，其中逻辑输入端 IN1~IN4 控制全桥驱动器的开关，使能端 ENA~ENB 输入标准 TTL 电平，脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)



图 2-4 L298N 实物图

Fig. 2-4 L298N physical picture

控制直流电机，以上均与树莓派 GPIO 相连，输出端 OUT1~OUT2 和 OUT3~OUT4 分别连接左侧和右侧的两个直流电机。

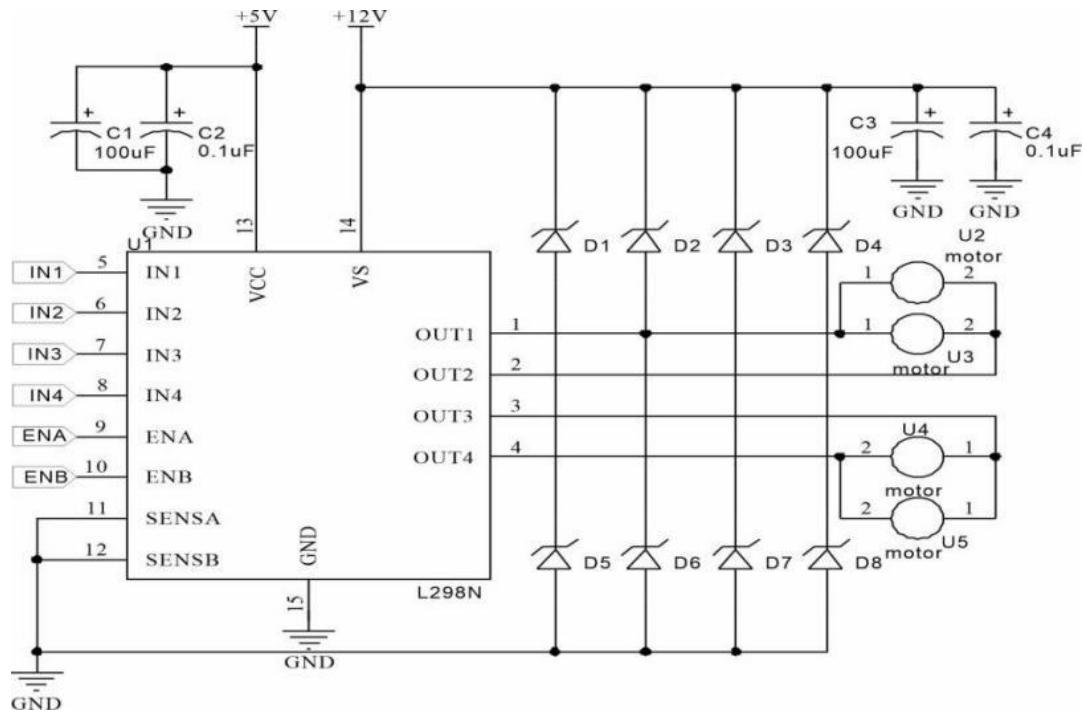


图 2-5 电机驱动电路

Fig. 2-5 Motor drive circuit

### 2.3.2 避障功能模块

机器人的智能避障功能由超声波传感器和两个红外传感器实现，分别置于前方和左右两侧，用于检测前方和两边的障碍物。超声波传感器与红外传感器实物图分别如图 2-6 和图 2-7 所示。



图 2-6 超声波传感器

Fig. 2-6 Ultrasonic sensor



图 2-7 红外传感器

Fig. 2-7 Infrared sensor

超声波传感器选用 HC-SR04，该模块的 Trig 和 Echo 功能分别是输入触发信号和传出信号回响，利用声音的反射获得发出波和接收波的时间差以计算障碍物距离<sup>[30]</sup>，计算公式为式（3.1），其中  $T$  为高电平持续时间， $V$  是声速。

$$S = \frac{T \times V}{2} \quad (3.1)$$

红外传感器有发射管与接收管，发射管发射出一定频率的红外线，若接收管没有接受到返回的红外光线则输出高电平，若收到时 OUT 引脚输出低电平，即检测到障碍物，模块的绿色灯亮起<sup>[31]</sup>。通过调节电位器能改变模块的检测距离，顺时针旋转即可增加距离，反之减少。器件规格如表 2-3 所示。

表 2-3 红外传感器规格参数

Tab. 2-3 Specification parameters of infrared sensor

规格	参数
工作电压	DC 3.3 V-5 V
工作电流	≥20 mA
工作温度	-10 °C-+50 °C
检测距离	2-30 cm
调节方式	多圈电阻式调节
有效角度	35°

### 2.3.3 电源模块

由于变电站温度巡检时间长和系统连接模块较多，导致机器人耗电速度快，为保证其持久的续航能力，配置两个电源模块分别给电机驱动模块和树莓派进行供电。



图 2-8 18650 锂电池

Fig. 2-8 18650 lithium battery

本文选用 18650 锂电池为电机驱动模块 L298N 供电,锂电池如图 2-8 所示,18650 中 18 含义为直径是 18 mm, 65 含义为高度是 65 mm, 0 代表圆形电池<sup>[32]</sup>。串联三节 18650 为 12.6 V 电池组可直接提供给直流电机以满足机器人的电机驱动需求。树莓派的额定电压为 5 V, 选用移动电源通过 Type-C 接口对其进行供电。而系统内的舵机需要 5 V 电压, 超声波传感器需要 5 V, 红外传感器需要 3.3 V-5 V, 温度传感器需要 3.3 V。树莓派板有 5 V 和 3.3 V 两种电压, 能够给以上各部件提供电源。

### 2.3.4 摄像头云台

云台作为承载摄像头的装置,可以很好的解决机器人系统中由于摄像头位置单一而无法满足变电站巡检任务的问题,本次设计在机器人前方安装摄像头云台,其中摄像头型号为 OV5647,云台是由两个 SG90 组成的二自由度舵机装置,其能够使镜头进行水平和垂直转动,从而达到更广泛的巡视角度。

#### 2.3.4.1 摄像头模块

为实现环境的实时监控和满足巡检过程中图像采集的要求,系统需要摄像头有较高的性能,本设计选用 OV5647 摄像头模块,实物如图 2-9 所示,该摄像头具有 500W 像素,最高支持 1080p/30FPS 的录制视频和 2592 x 1944 的静态图片<sup>[33]</sup>,具有自动变焦和驱动功能,画面质量高于传统 USB 摄像头,电路结构简单<sup>[34]</sup>,可满足设计要求,且具有功率低等优点,表 2-4 为 OV5647 的主要技术指标参数。该模块与树莓派的板载 CSI 连接,并安装在二自由度舵机云台上,图像通过 WiFi 无线传输至工作后台。



图 2-9 OV5647 实物图

Fig. 2-9 OV5647 physical picture

表 2-4 摄像头主要技术指标参数

Tab. 2-4 Main technical index parameters of camera

指标	参数
输出格式	8-10 位 RGB RAW 数据
镜片主光线角度	24°
输入时钟频率	6-27 MHz
敏感性	600 mV/每光秒
像素尺寸	1.4 $\mu$ m * 1.4 $\mu$ m
图像范围	3673.6 $\mu$ m * 2738.4 $\mu$ m

### 2.3.4.2 舵机云台

为扩大视野范围，设置二自由度舵机云台搭载摄像头，根据控制方式，舵机分为模拟舵机和数字舵机，二者之间的对比如表 2-5 所示。

表 2-5 模拟舵机和数字舵机对比

Tab. 2-5 Comparison between analog servo and digital servo

	控制电路	控制方式	控制效果
模拟舵机	无晶振和处理器	若要使其保持在规定位置或按照某个速度转动，需要不停的发送信号	成本低、寿命长
数字舵机	有晶振和处理器	只需发送一次信号就可保持位置	精确、成本较高、寿命短

综合对比，在对控制精度没有特殊要求的情况下，选用模拟舵机，本设计使用两个 SG90 组成摄像头云台，分别控制水平转动和垂直转动，如图 2-10 所示。舵机的 SIG 线为信号线，接收树莓派发出的 PWM 信号。



图 2-10 二自由度舵机实物图

Fig. 2-10 Physical picture of two-degree-of-freedom steering gear

## 2.4 温度传感器模块

系统采用远距离红外测温传感器 MLX90614 进行温度的检测，其通过探测物体红外辐射能量的大小和波长的分布来检测物体的表面温度<sup>[35]</sup>。其电路原理如图 2-11 所示。ML90614 的温度数据输出有脉冲宽度调制和系统管理总线（System Management Bus, SMBus）两种模式，工作电压是 5 V, -70.01 °C~+382.19 °C 为其可测量的物体温度范围，-40 °C~125 °C 为其环境温度<sup>[36]</sup>。管脚功能如表 2-8 所示，本系统中 MLX90614 与树莓派通过 SMBus 协议进行通信，实现传感器配置和数据读取等功能。

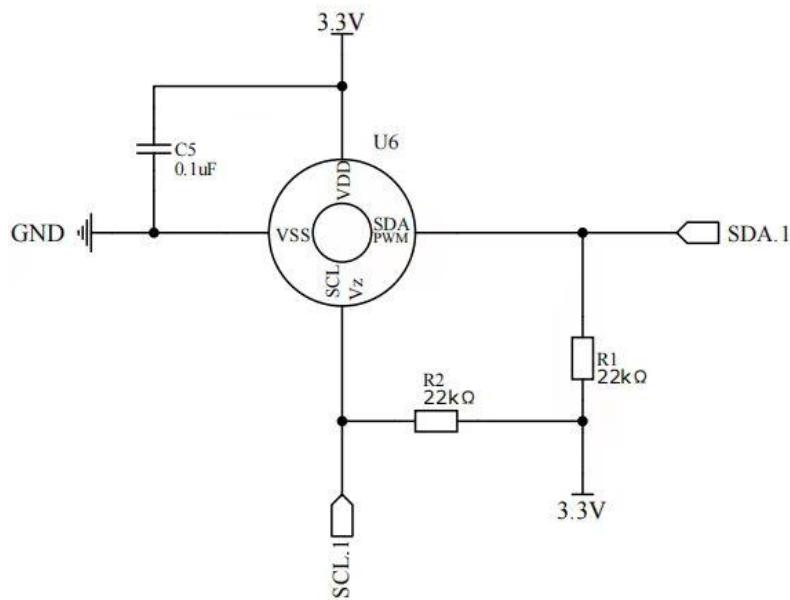


图 2-11 MLX90614 电路原理图

Fig. 2-11 MLX90614 Circuit Schematic Diagram

表 2-6 MLX90614 引脚功能

Tab. 2-6 MLX90614 pin function

名称	功能描述
VSS	电源地，金属外壳和该管脚相连
SCL/Vz	SMBus 接口的数据信号/8-16V 电源供电时接三极管基极
PWM/SDA	PWM/SMBus 接口的数据信号，通常从该管脚通过 PWM 输出物体温度
VDD	电源

## 2.5 本章小结

本章根据变电站巡检机器人的总体方案进行电路设计，介绍了系统的硬件组成。首先分析主控芯片的设备选型和参数，然后分别对各部分组件原理进行详细介绍，包括驱动模块电路设计、避障模块设计、电源模块设计、摄像头模块设计以及温度采集模块等。每个模块的设计符合抗干扰性和安全性要求，保证系统稳定运行。

## 3 巡检机器人软件设计

### 3.1 机器人软件设计总述

软件设计遵循可靠性和健壮性的原则，在此前提下追求程序的简洁性和安全性。将整体系统应用模块化的方式进行程序编写，各部分的函数编写完成后再集成，方便后期维护和功能测试。在系统软件设计中，本文主要分为两个部分：

(1) 运动控制部分：包括机器人自身的运动控制和舵机的驱动，以及 Web 网页的程序编写。此部分属于系统的基础功能，基于机器人的主体部分，Python 语言编写底层控制程序，超文本标记语言（Hyper Text Mark-up Language，HTML）编写用户控制界面，在无线通信网中实现上述功能。

(2) 定位、测温和数据存储部分：系统实现的核心功能，对高压开关柜位置信息的识别、温度的测量和信息的存储。这部分运用开源的计算机视觉库（Open Source Computer Vision Library，OpenCV）以及 Pyzbar 算法实现对含有位置信息的二维码标签进行识别来实现定位功能，应用温度传感器测温以后将测温时间、位置和温度值存入 SD 卡中。

### 3.2 系统开发环境搭建

首先为树莓派配置操作环境，Raspbian 自带轻量级 python 集成开发环境（Integrated Development Environment，IDE）Thonny，thonny 是基于 python 内置图形库 tkinter 开发的支持 Linux、Windows 和 Mac 多平台的 IDE 平台<sup>[37]</sup>，树莓派的系统硬盘是 SD 卡，将系统烧录至 SD 卡内，登录官网下载 Raspbian 镜像至本地，并将系统烧录至树莓派硬盘内<sup>[38]</sup>，将树莓派通过有线通信连接方式接入局域网，即可在电脑端通过 VNC 功能访问树莓派桌面，如图 3-1 所示，在 VNC Server 中输入树莓派 IP 地址、用户名和密码即可实现连接，开启 WiFi 连接后，电脑与树莓派可以通过无线通信方式进行数据传送。登录树莓派以后，开启“I2C”、“Remote GPIO”等设置，软件部分编程环境如图 3-2 所示。

## 基于树莓派的温度巡检机器人设计与实现

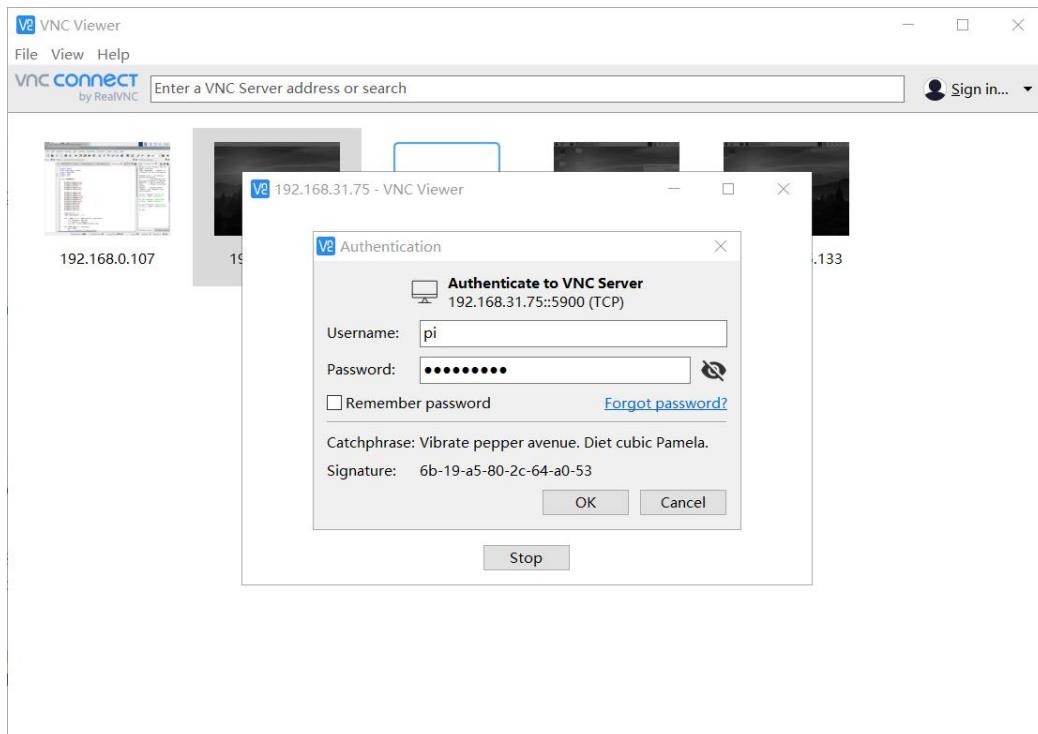


图 3-1 树莓派登录界面

Fig. 3-1 Raspberry Pi login interface

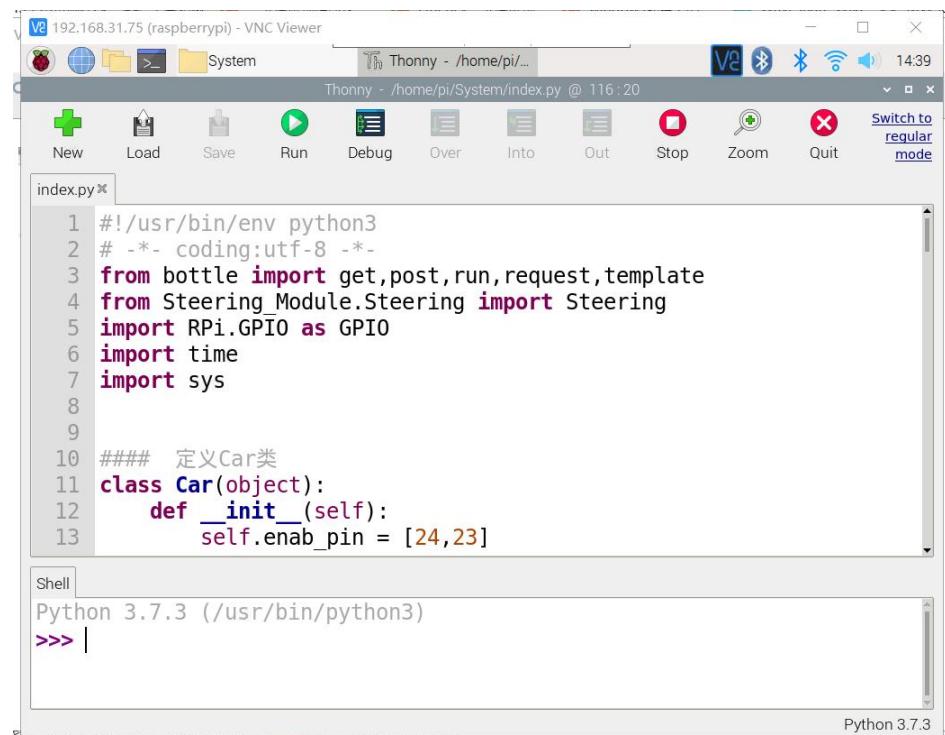


图 3-2 软件编程环境

Fig. 3-2 Software programming environment

### 3.3 电机驱动

本设计中用四个直流电机来驱动机器人，L298N 可提供两路电机驱动，一侧连接两个直流电机，用同一路 PWM 来控制，因此同侧的前轮和后轮速度是同步的，四轮差速模型如图 3-3 所示。

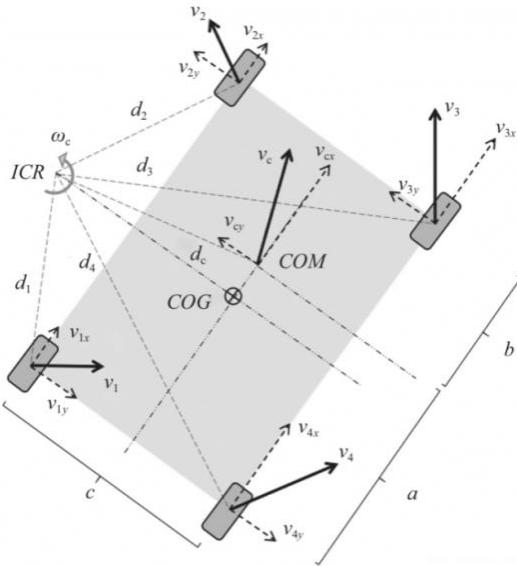


图 3-3 四轮差速模型

Fig. 3-3 Four-wheel differential model

以机器人底盘几何中心  $COG$  沿  $y$  轴方向上的点  $ICR$  作为整个底盘进行圆周运动时的圆心， $ICR$  和  $COG$  的距离大小与圆周运动角速度大小有关。四个车轮到  $ICR$  的距离为  $d_i$ ，车轮的实际速度  $v_i$  是侧向滑动速度  $v_{iy}$  和预设目标速度  $v_{ix}$  的合成速度，其中  $i=1,2,3,4$ 。在模型中底盘的速度瞬心在质心  $COM$  处，而  $COM$  和  $COG$  通常是不重合的。用  $COM$  位置处的线速度  $v_c$  和角速度  $\omega_c$  表示整个底盘的运动速度，其中  $COM$  到  $ICR$  的距离为  $d_c$ 。 $v_c$  垂直于  $ICR-COM$  线段， $v_c$  有预设目标速度  $v_{cx}$  分量和侧向滑动速度  $v_{cy}$  分量。底盘中左轮、右轮轴距为  $c$ ，点  $COM$  与底盘后端以及前端的距离分别为  $a$  和  $b$ 。

假设线  $d_c$  与  $y$  轴的夹角为  $\partial_c$ ，且四个车轮绕  $ICR$  旋转的角速度也是  $\omega_c$ ，根据物体绕圆心做圆周运动时线速度、角速度和圆周半径的关系，建立约束关系式：

$$\begin{cases} \omega_c = \frac{v_c}{d_c} = \frac{v_c \cos \partial_c}{d_c \cos \partial_c} = \frac{v_{cx}}{d_{cx}} = \frac{v_i}{d_i} = \frac{v_i \cos \partial_i}{d_i \cos \partial_i} = \frac{v_{ix}}{d_{ix}} \\ \omega_c = \frac{v_c}{d_c} = \frac{v_c \sin \partial_c}{d_c \sin \partial_c} = \frac{v_{cy}}{d_{cy}} = \frac{v_i}{d_i} = \frac{v_i \sin \partial_i}{d_i \sin \partial_i} = \frac{v_{iy}}{d_{iy}} \end{cases} \quad (3.1)$$

$d_i$  与  $d_c$  在  $x$  轴和  $y$  轴上的投影长度满足:

$$\begin{cases} d_{1y} = d_{2y} = d_{cy} - \frac{c}{2} \\ d_{3y} = d_{4y} = d_{cy} + \frac{c}{2} \end{cases} \quad (3.2)$$

机器人的左前轮和左后轮速度为  $V_L = v_{1x} = v_{2x}$ , 右前轮和右后轮速度为  $V_R = v_{3x} = v_{4x}$ 。因此, 可得出:

$$\begin{cases} V_L = \omega_c \cdot (d_{cy} - \frac{c}{2}) = \omega_c \cdot d_{cy} - \omega_c \cdot \frac{c}{2} = v_{cx} - \omega_c \frac{c}{2} \\ V_R = \omega_c \cdot (d_{cy} + \frac{c}{2}) = \omega_c \cdot d_{cy} + \omega_c \cdot \frac{c}{2} = v_{cx} + \omega_c \frac{c}{2} \end{cases} \quad (3.3)$$

整理得四轮差速底盘的前向运动学关系:

$$\begin{bmatrix} v_{cx} \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{c} & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_L \\ V_R \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

本次设计采用直流电机驱动, 通过树莓派管脚输出的 PWM 信号对电机进行控制。电机驱动逻辑控制如表 3-1 所示, 使能端 ENA 和 ENB 为高电平时电机可转动, 输入端 IN1~IN4 使电机以不同的方式运转从而让系统实现各种运动过程。IN1 和 IN3 高电平, IN2 和 IN4 低电平时电机正转, 小车前进; 反之小车后退; IN1 和 IN2 低电平, IN3 高电平, IN4 低电平时, 左边电机不转, 右边电机正转, 两轮形成速度差实现左转; 反之小车右转<sup>[39]</sup>。根据以上逻辑编写控制电机驱动的程序文件 car.py。

表 3-1 L298N 逻辑控制关系表

Tab. 3-1 L298N logic control relationship table

直流 电机	旋转 方式	IN1	IN2	IN3	IN4	PWM 调速信号	
						ENA	ENB
M1/M2	正转	高	低			高	
	反转	低	高			高	
	停止	低	低			高	
M3/M4	正转			高	低		高
	反转			低	高		高
	停止			低	低		高

### 3.4 舵机驱动

二自由度舵机平台由两个伺服舵机 SG90 组成，其基本工作原理如图 3-4 所示。

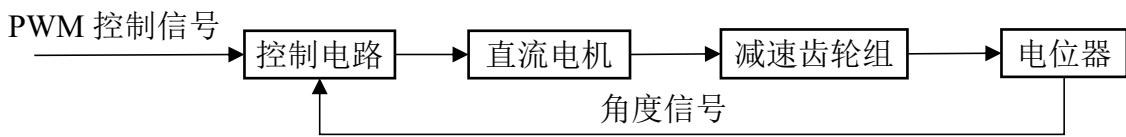


图 3-4 伺服舵机工作原理

Fig. 3-4 Working principle of servo steering gear

舵机接收的 PWM 信号频率为 50 Hz，周期为 20 ms，给舵机输入不同占空比的脉冲能使它转到不同角度。脉冲占空比  $D$  与舵机角度  $\theta$  ( $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ ) 的关系为：

$$D = 2.5 + \frac{\theta}{180} \times (12.5 - 2.5) \quad (3.5)$$

基于以上原理编写舵机的控制程序，编写文件引入所需的库函数 RPi.GPIO、atexit，定义舵机的正转 forwardRotation 和反转 reverseRotation，为保护舵机在使用过程中始终处于标准角度范围内，定义最小角度 min\_angle 和最大角度 max\_angle；由硬件部分可知，水平方向舵机连接树莓派引脚 15（BCM 编码），垂直方向舵机引脚连接引脚 14（BCM 编码），编写文件 camera.py 定义云台两个方向的引脚控制，导入文件 steering.py 分别设置云台水平方向的左右转动以及垂直方向的上下转动。

### 3.5 视频回传和远程控制

#### 3.5.1 视频回传

机器人通过摄像头回传图像对变电站进行环境巡检监控，首先在树莓派中配置摄像头，在终端输入指令 sudo raspi-config 打开树莓派配置，选择如图 3-5(a)所示选项 Interface Options，选择 P1 Camera 设置打开摄像头选项，如图 3-5(b)所示，重启系统默认打开树莓派摄像头。摄像头采用读取视频流方法实时回传图像，设置分辨率和帧率适应网络传输速度，最大程度消除画面卡顿现象。

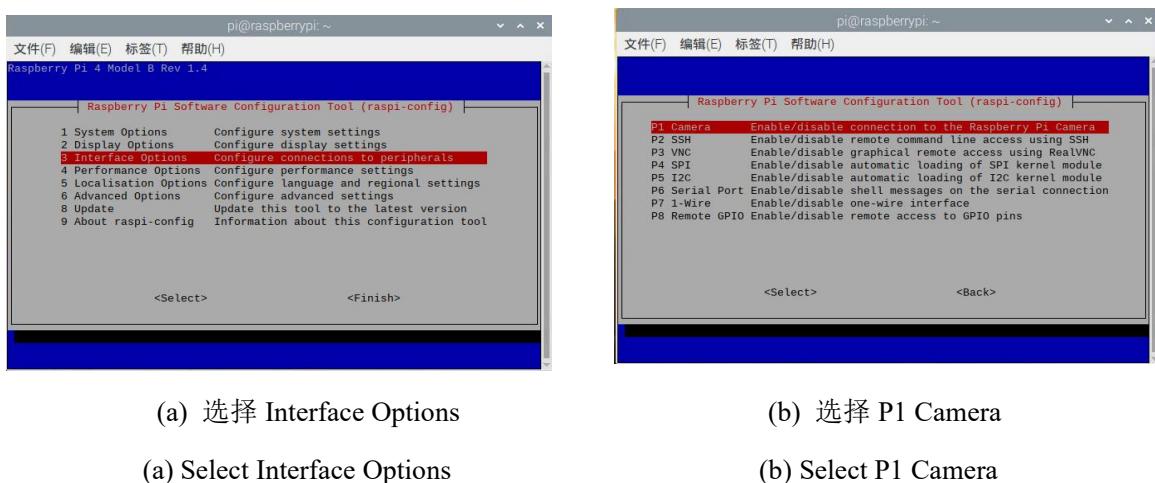


图 3-5 配置摄像头

Fig. 3-5 Configure camera

### 3.5.2 远程控制

系统采用在树莓派搭建 web 服务器的方法进行客户端与服务端的信息交互。前端开发应用 HTML 搭建客户端与服务器的交互网页站点，创建 Web 应用程序建立与硬件脚本联系，给页面上各虚拟按键赋予唯一标识，调用轻量级 Bottle 库实现服务器与底层控制程序间的通信；应用 python 编写硬件控制主程序，导入电机和舵机程序，定义各模块动作的函数变化。

Web 页面由 HTML、CSS (Cascading Style Sheets) 和 JavaScript 共同构成。其中：HTML 是用来描述 Web 页面内容和结构的超文本链接标识语言。CSS 是一种为结构化文档添加样式和布局的计算机语言<sup>[40]</sup>。JavaScript 的完整实现包含三个部分：浏览器对象模型 (Browser Object Model, BOM)、文档对象模型 (Document Object Model, DOM)、核心(ECMAScript)<sup>[41]</sup>。

当用户触发对应按键时，客户端会向 Web 服务器传输数据，这一过程使用超文本传输协议<sup>[42]</sup> (Hyper Text Transfer Protocol, HTTP) 通信协议来完成。首先建立传输控制协议(Transmission Control Protocol, TCP)连接，浏览器发送请求指令和请求头信息给服务器，服务器发送应答头信息并向浏览器发送数据，服务器关闭 TCP 连接。TCP 三次握手如图 3-6 所示。

浏览器向服务器发去请求后，服务器将消息转给 Web 应用程序处理，处理结束后把结果返回给服务器，但由于 Web 服务器和 Web 应用框架种类繁多，因此应用一种 Web 服务器和应用框架之间的接口标准规范—Web 服务器网关接口(Web Server

Gate Interface, WSGI), 其响应流程如图 3-7 所示。

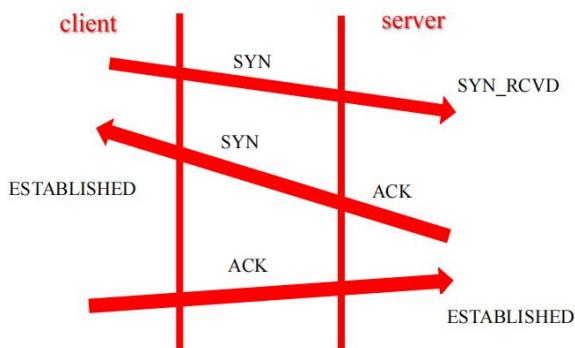


图 3-6 TCP 三次握手

Fig.3-6 TCP Triple Handshake

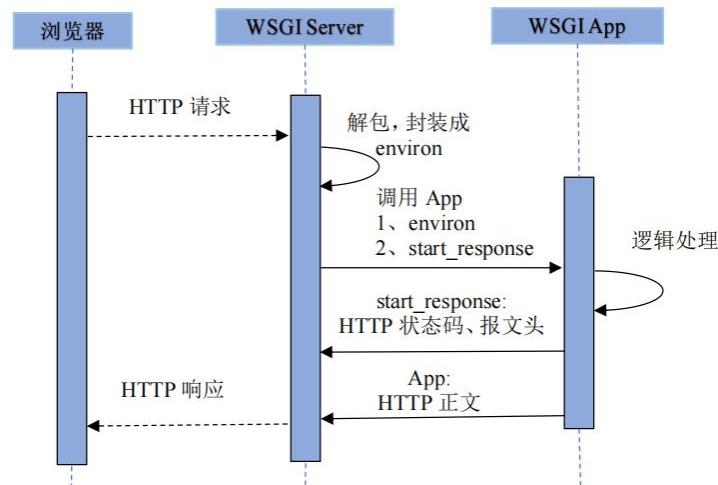


图 3-7 WSGI 响应流程

Fig. 3-7 WSGI response process

- (1) 浏览器的发送请求送到 WSGI Server;
  - (2) WSGI Server 将 HTTP 请求中的信息封装到 `environ` 中;
  - (3) WSGI Server 将 `environ` 和 WSGI Server 中的函数 `start_response` 注入到编写的后台程序中;
  - (4) 后台函数接收 `environ` 和 `start_response`, 逻辑处理结束返回一个元素是 HTTP 正文的可迭代对象;
  - (5) 处理结束后, 调用 `start_response` 函数将 HTTP 状态码等消息给 WSGI Server, 将函数的返回值作为 HTTP 正文给 WSGI Server;
  - (6) WSGI Server 将从后台程序中获取的信息封装成一个 `response` 返回给浏览器。
- 远程控制功能部分客户端的 HTML 语言程序的编写界面如图 3-8 所示, 分别设计“car”和“camera”两个部分的按键。

```

index.html - Mousepad
文件(F) 编辑(E) 搜索(S) 视图(V) 文档(D) 帮助(H)
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
<meta charset="UTF-8">
<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
<title>遥控</title>
<link href="http://cdn.bootcss.com/bootstrap/3.3.5/css/bootstrap.min.css" rel="stylesheet" media="screen">
<script src="http://cdn.staticfile.org/jquery/2.2.4/jquery.min.js"></script>
<style type="text/css">
    #front {
        margin-left: 56px;
        margin-bottom: 3px;
    }
    #rear{
        margin-top: 3px;
        margin-left: 56px;
    }
    .btn{
        background: #62559f;
    }

```

图 3-8 HTML 编程界面

Fig. 3-8 HTML programming interface

完成客户端界面设计以后，编写文件 index.py 链接其与前面章节已经完成的电机和舵机控制程序，导入文件 car.py 和 camera.py，定义主函数将电机的运动状态和

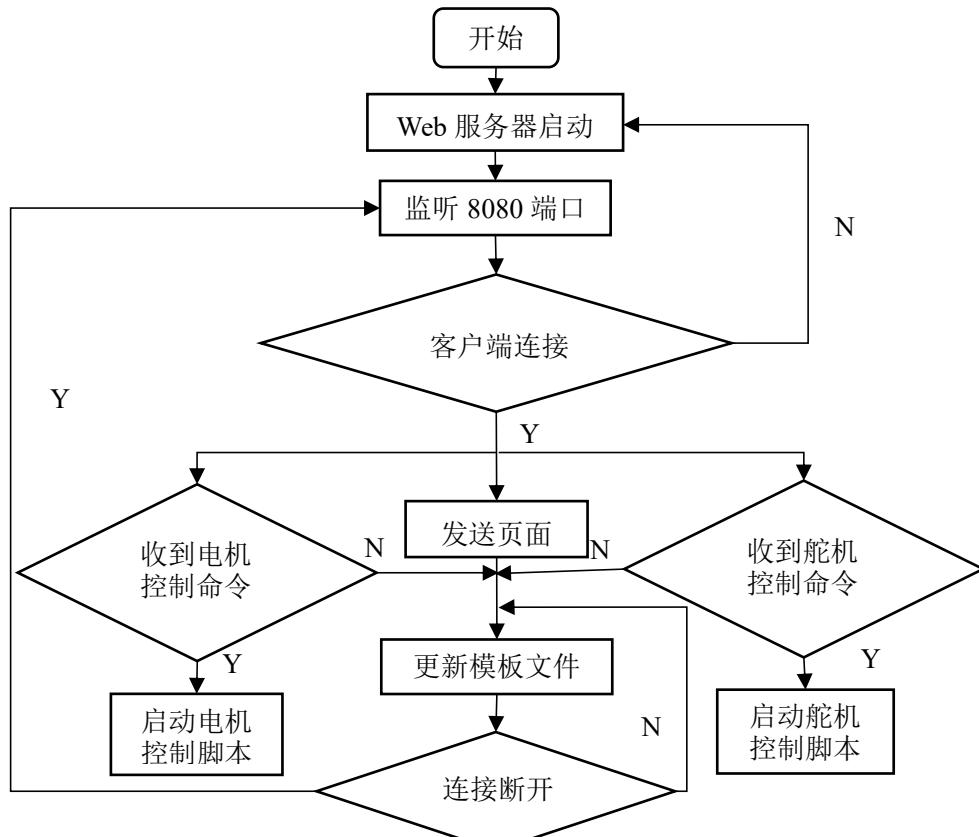


图 3-9 远程控制流程图

Fig. 3-9 Remote control flow chart

舵机的旋转动作与 web 界面的虚拟按键一一对应，导入库函数 bottle 建立与 web 服务器的连接。远程控制流程如图 3-9 所示，程序开始运行后，询问 8080 端口是否有同一局域网下的客户端连接，如果是，服务器发送数据包给客户端，浏览器将收到的数据解析成图像界面呈现给用户<sup>[43]</sup>。按下按键，服务器接收到命令，启动电机或舵机控制脚本，实现相应的动作变化。如果监听到端口断开，则停止程序运行。

### 3.6 避障功能

电力系统的设备升级使得变电站巡检机器人的作业环境更加复杂，可能会存在较多障碍物，如果机器人无法及时避开障碍物，则可能会使其发生碰撞造成系统损坏甚至报废的结果<sup>[44]</sup>。因此为其设置自主避障功能是保证机器人巡检工作效率和质量的前提，系统利用传感器并结合避障算法来实现此部分功能。

为了提升变电站巡检机器人的避障性能，安装超声波传感器和红外传感器共同实现自主避障功能。运用超声波的测距功能避开一定距离内的障碍物，利用红外传

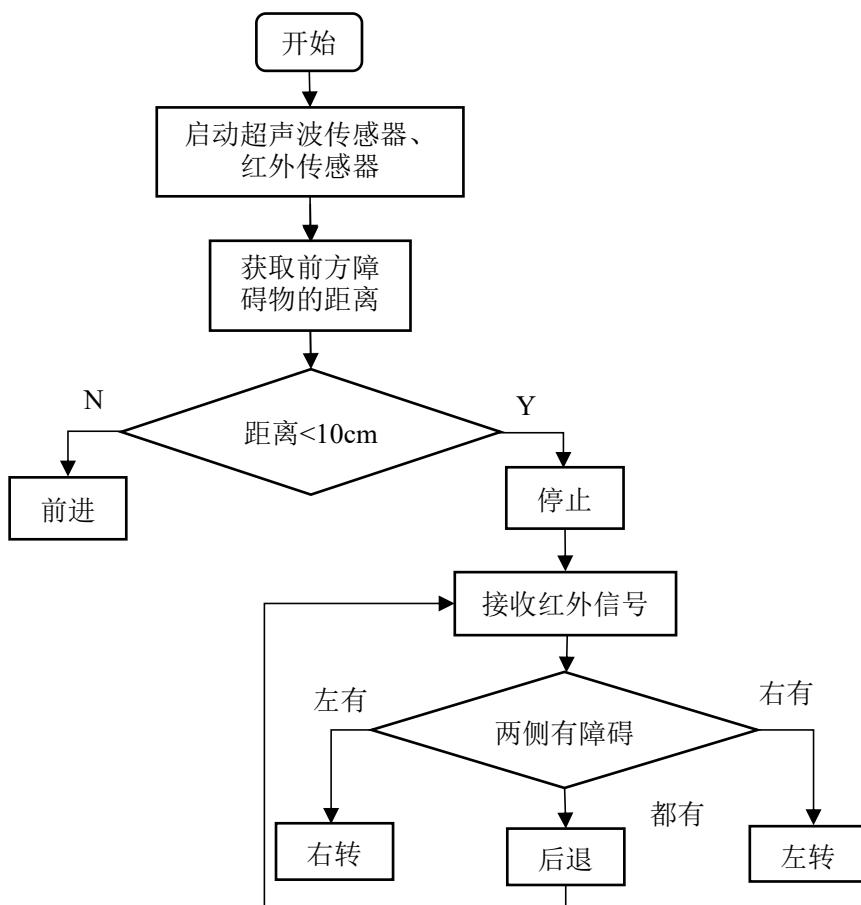


图 3-10 避障算法流程

Fig. 3-10 Obstacle avoidance algorithm flow

感器的红外线接收与否判断两侧的障碍物。系统的避障算法流程如图 3-11 所示，程序初始化后，各传感器开始运行，设置前方安全距离为 10cm，超声波传感器检测前方物体距离，若大于安全距离则前进，若小于则停止，继续接受红外传感器的信号，如果左侧发现障碍物就右转，反之左转，若两侧都存在障碍物则后退，直至检测到某一方向安全则转向。

### 3.7 定位、测温和存储功能

高压开关柜作为交流金属封闭开关设备的一种，具有发、配、输电中承担各级电压控制等重要电气功能<sup>[45-46]</sup>，因此要保证其稳定运行。而在设备运行过程中，由于某些连接件接触不良造成电阻增大、电压效应和电流效应等原因，可能会造成不同程度的异常发热现象<sup>[47]</sup>，因此设备的温度是其重要指标。变电站中高压开关柜数量众多，传统人工巡检主要依靠纸质表格等记录方式，还有可能存在误读、漏读的情况发生。针对以上弊端，本系统设计一种对各柜体实现准确定位的方式，并选用非接触式温度传感器对高压开关柜内进行温度测量。为方便后续工作人员查询记录，在对各设备进行定位和测温以后将自动生成报表将信息进行上传与存储。

#### 3.7.1 定位方法

##### 3.7.1.1 位置标签设置

随着信息技术的发展，可用来存储位置信息的载体逐渐丰富：智能卡、射频标签和条码等。二维码作为一种常见的条码类型，兼具一维码的成本低等特点，且有存储容量大、保密安全性高、快速扫描和纠错能力强等优势<sup>[48]</sup>，因此本文采用二维码作为位置信息载体。

上世纪 80 年代末，美国等国家的企业和研究机构开始研究二维码：1989 年美国一家公司发明矩阵二维条码，适用于小零件的识别等<sup>[49]</sup>；PDF417 码是一种便携式数据文件，具备信息含量高和密度高等特点，常出现于证件及一些防伪需求高的文件上<sup>[50]</sup>，在 1991 年制定完成；1992 年美国联合包裹运送服务公司（United Parcel Service, UPS）研制了一种矩阵式二维条码 Maxicode 用于存放较为详细的包裹资料<sup>[51]</sup>；1994 年，日本 Denso 公司发明了快速响应（Quick Response, QR）码；微软公司在 2009 年制定了新增色彩维度的二维码“Microsoft Tag”<sup>[52]</sup>。

QR 码最初用于汽车零部件的追踪，现已广泛应用于移动支付、防伪查询和消费

凭证等场合<sup>[53]</sup>，而且生成方便，所以本设计中采用该码来存储高压开关柜的位置编码信息。QR 码的符号结构如图 3-11 所示，其包含功能编码区域（格式信息、版本信息和数据域纠错码字）和图形（位置探测图形、位置探测图形分隔符、定位图形和校正图形）两部分，分别用于存储信息和定位校正图形，四周是空白区<sup>[54]</sup>。图 3-12 是本实验所用二维码标签示例。

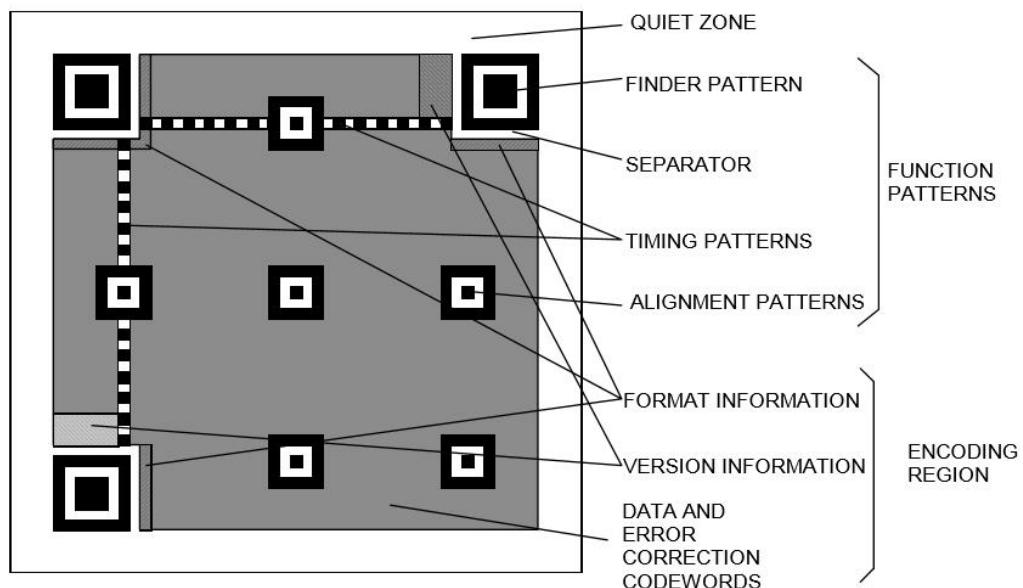


图 3-11 QR 码符号结构

Fig. 3-11 QR code symbol structure

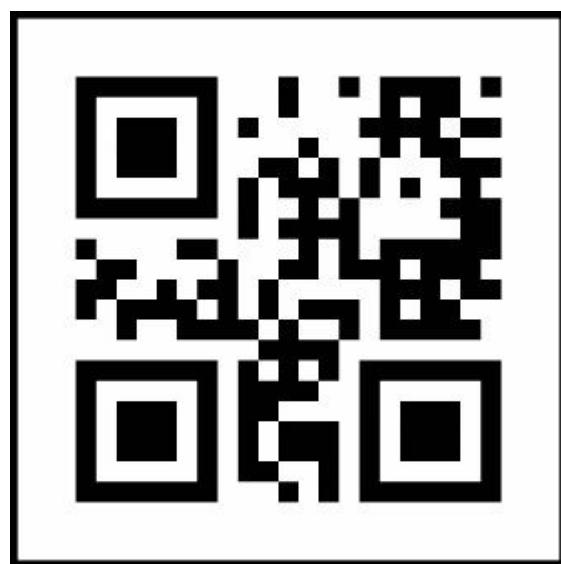


图 3-12 本实验所用二维码标签示例

Fig. 3-12 Example of QR code label used in this experiment

### 3.7.1.2 位置信息识别

位置信息识别过程即二维码解码过程基于 OpenCV 和 Pyzbar<sup>[55]</sup>来完成。OpenCV 是一个基于伯克利软件套件 (Berkeley Software Distribution, BSD) 许可发行的跨平台计算机视觉库<sup>[56]</sup>, 有以下优点: 具有统一功能和结构定义、二维数组运算和图像处理能力强和用户界面灵活<sup>[57]</sup>。ZBar<sup>[58]</sup>基于 C 语言编写, 能够识别一维码和二维码, 且能够在多平台运行, 而 Pyzbar 是用于支持 Python 环境下实现 ZBar 解码。

首先在树莓派系统中安装本实验中涉及到的库, 通过在终端依次输入以下指令:

(1) sudo apt-get install libatlas-base-dev; (2) sudo apt-get install libjasper-dev; (3) sudo apt-get install libqtgui4; (4) sudo apt-get install python3-pyqt5; (5) sudo apt install libqt4-test; (6) pip install opencv-python 来安装 OpenCV, 安装成功界面如图 3-13 所示。在终端执行指令: sudo pip3 install pyzbar 用于安装 pyzbar。此时二维码识别所需要的库均已下载完毕。在终端输入指令: sudo apt-get install spyder 安装 spyder 编译器, 编写位置标签识别代码界面如图 3-14 所示。

```

pi@raspberrypi: ~
File Edit Tabs Help
Building dependency tree... Done
Reading state information... Done
python3-pyqt5 is already the newest version (5.15.2+dfsg-3).
python3-pyqt5 set to manually installed.
The following package was automatically installed and is no longer required:
  libfuse2
Use 'sudo apt autoremove' to remove it.
0 upgraded, 0 newly installed, 0 to remove and 0 not upgraded.
pi@raspberrypi: ~ $ sudo apt install libqt4-test
Reading package lists... Done
Building dependency tree... Done
Reading state information... Done
E: Unable to locate package libqt4-test
pi@raspberrypi: ~ $ pip3 install opencv-python
Looking in indexes: https://pypi.org/simple, https://www.piwheels.org/simple
Collecting opencv-python
  Downloading opencv_python-4.7.0.72-cp37-abi3-manylinux_2_17_aarch64.manylinux2014_aarch64.whl (40.4 MB)
[██████████] 40.4 MB 25 kB/s
Requirement already satisfied: numpy>=1.17.0 in /usr/lib/python3/dist-packages (from opencv-python) (1.19.5)
Installing collected packages: opencv-python
Successfully installed opencv-python-4.7.0.72
pi@raspberrypi: ~ $

```

图 3-13 OpenCV 安装成功界面

Fig. 3-13 OpenCV Installation Success Interface

### 3 巡检机器人软件设计

```
1 #!/usr/bin/env python2
2 # -*- coding: utf-8 -*-
3 """
4     * @par Copyright (C): 2010-2019, Shenzhen Yahboom Tech
5     * @file         qr_code
6     * @version      V1.0
7     * @details
8     * @History
9     * @author: longfuSun
10 www
11
12 import sys;
13
14 reload(sys);
15 sys.setdefaultencoding("utf8")
16 from imutils.video import VideoStream
17 from pyzbar import pyzbar
18 import argparse
19 import datetime
20 import imutils
21 import time
22 import cv2
23 import csv
24
25
26 ap=argparse.ArgumentParser()
27 #提供一个csv文件，这样，在最后不仅可以将二维码内容显示在屏幕上，还有专门的文件进行保存
28 ap.add_argument("-o", "--output", type=str, default="num.csv",
29                 help="path to output csv file containing barcode")
30 args=vars(ap.parse_args())
31
32 print('starting video stream....')
33 #使用树莓派自带摄像头的方法是：
34 vs=VideoStream(usePiCamera=True).start()
35 time.sleep(2.0)
36 #把内容写入csv
37 csv=open(args["output"], "w")
38 header_list = ['time', 'num']
```

Permissions: RW | End-of-lines: LF | Encoding: UTF-8 | Line: 68 | Column: 1 | Memory: 33 %

图 3-14 spyder 编译器界面

Fig. 3-14 Spyder compiler interface

二维码的识别流程图如图 3-15 所示，算法步骤及其主要函数实现如下：

- (1)程序算法初始化：创建一个扫描器对象，对其进行初始化；
- (2)读取图片并转为灰度图像，调用构造函数初始化图像，通过 scan()方法解析图像，函数 zbar\_scan\_image()配置校验并以 Z 字型为路径逐行扫描图像，转换成明暗宽度流；
- (3)对明暗宽度流进行处理，通过计算各宽度之间的宽度信息提取图案特征，和各标准进行比对以寻找符合的条码。
- (4)对本课题中的 QR 码识别时，通过计算当前行的宽度流，判断是否满足寻定位图案特征：如果不满足则忽略当前数据，如果满足，将宽度流描述为一个线段结构，把横向线段结构变量存入横向线段集合。以 N 字型路径对图像逐列扫描，得出纵向明暗高度流，将符合 QR 码的纵向线段存入纵向线段集合。
- (5)对图像进行解析，筛选、聚类横向线段和纵向线段集合并求取交叉点<sup>[59]</sup>，得到 QR 码中三个定位图案的中心，如果中心点数小于三个则未能解析该码，如果不是则对图像进行阈值自适应二值化处理；
- (6)对 QR 码进行码字读取，按照顺时针对中心点排序并仿射变化，得出 QR 码

的模块宽度和版本码字，找到格式信息并解码，对数据区进行解析，消除掩模处理图像，识别出定位图案，将 QR 码中除功能区的区域转换为二进制比特流；

(7)对比特流进行校验和纠错，输出最终比特流，对其分析判断得到编码模式，对比特流进行解码输出结果。

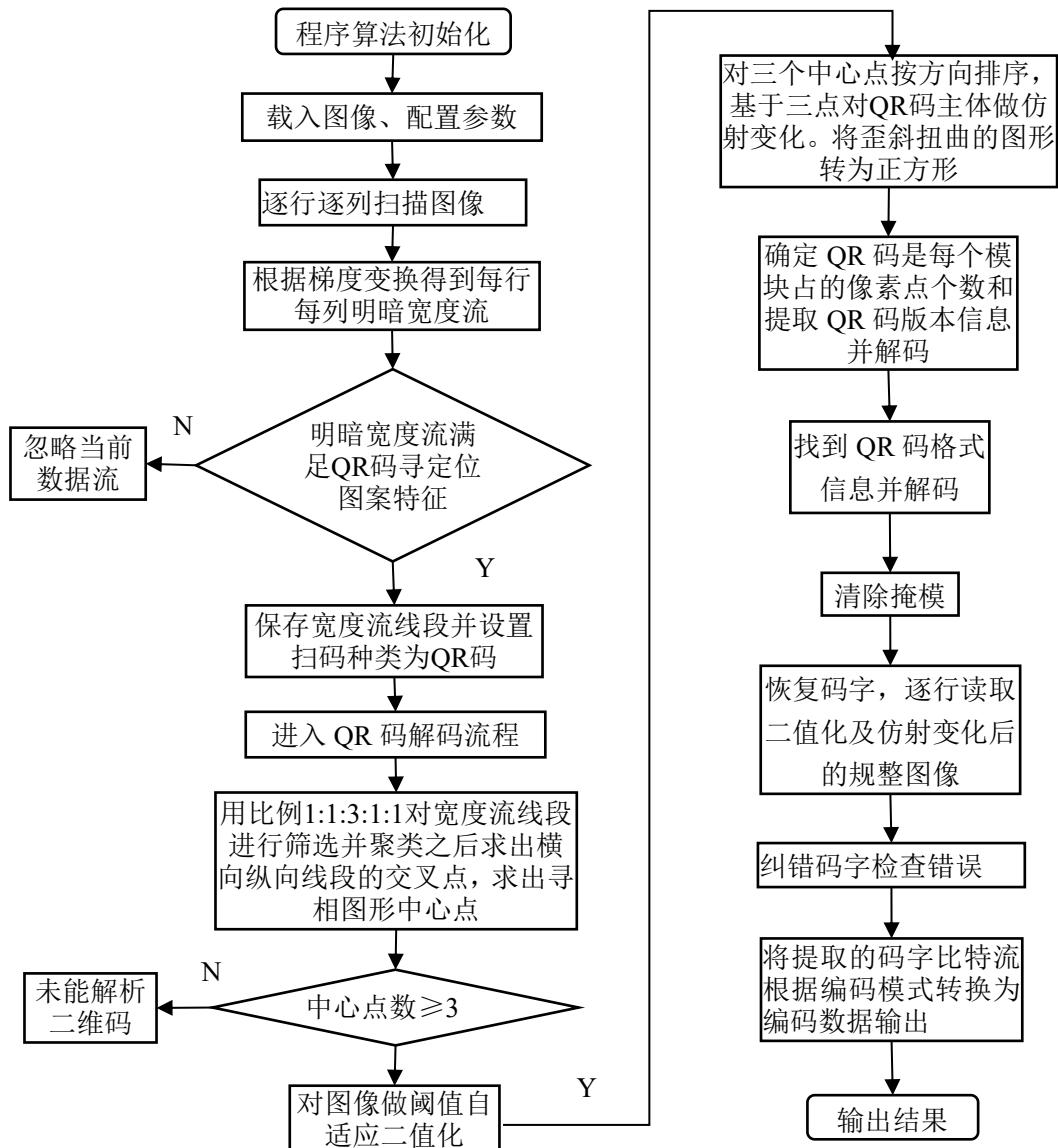


图 3-15 二维码识别流程

Fig. 3-15 QR code identification process

### 3.7.2 测温功能

#### 3.7.2.1 MLX90614 简介

温度高于绝对零度的物体都可以发射红外辐射并通过该窗口将热量直接辐射至外太空<sup>[60]</sup>，其为红外辐射测温的依据，黑体辐射测温理论最基本定律是普朗克定律<sup>[61]</sup>：

$$M_{b\lambda}(T) = \int_0^{\infty} \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{d\lambda}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} \quad (3.6)$$

其中:  $M_{b\lambda}(T)$  为黑体的光谱辐射出射度,  $W/(m^2 \cdot \mu m)$ ;  $\lambda$  为波长,  $\mu m$ ;  $T$  为绝对温度,  $K$ ;  $c_1$ 、 $c_2$  为第一、第二辐射常数。

对式 (3.6) 的  $\lambda$  积分计算得:

$$M_b(T) = \int_0^{\infty} \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{d\lambda}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} \quad (3.7)$$

令  $x = \frac{c_2}{\lambda T}$ , 则  $d\lambda = -\frac{c_2}{x^2 T} dx$ , 则 (4.2) 可写为:

$$M_b(T) = \int_0^{\infty} \frac{c_1}{(c_2/xT)^5} (1 - e^{-c_2/(xT)})^{-1} \left(\frac{c_2}{x^2 T}\right) dx = \frac{c_1}{c_2^4} \cdot \frac{\pi^4}{15} T^4 \quad (3.8)$$

令 (3.8) 中  $\frac{c_1}{c_2^4} \cdot \frac{\pi^4}{15} = \sigma$ , 则有:

$$M_b(T) = \sigma T^4 \quad (3.9)$$

其中  $\sigma = 5.67032 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ , 式 (4.4) 为斯蒂芬-玻尔兹曼辐射定律。

在全辐射测温法中, 物体的辐射出射度一般小于黑体的辐射出射度, 二者之比是物体表面的发射率  $\varepsilon$  [62], 数学表达式为:

$$\varepsilon = \frac{M(T)}{M_b(T)} \quad (3.10)$$

物体辐射出射度为

$$M(T) = \varepsilon \sigma T^4 \quad (3.11)$$

物体的表面发射率  $\varepsilon$  与辐射出射度  $M(T)$  及温度之间关系可用式 (3.12) 表示。

$$T = \left(\frac{M(T)}{\varepsilon \sigma}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.12)$$

本系统选用非接触式红外温度传感器 MLX90614 完成对高压开关柜的温度测量, 并选用其两种温度输出方式中的 SMBus 接口输出。在树莓派安装 IIC 库, 执行命令 sudo raspi-config 打开 IIC 接口, 输入 i2cdetect -y 1 查看模块地址为 0×5a, 如图 3-16 所示, 说明已经检测到模块。

```
pi@raspberrypi:~ $ i2cdetect -y 1
  0  1  2  3  4  5  6  7  8  9  a  b  c  d  e  f
00: --
10: --
20: --
30: --
40: --
50: --      5a --
60: --
70: --
```

图 3-16 查看 MLX90614 模块地址

Fig. 3-16 View MLX90614 module address

树莓派通过 SMBus 总线和 MLX90614 进行通信。SMBus 接口的数据传输方式分为 Master to Slave 和 Slave to Master 传输方式,数据的发送和接收都以字节为单位<sup>[63]</sup>。发送一个字节后,判断对方是否应答,若有就发送下一字节,否则重复发送该字节,直到有应答再继续发送<sup>[64]</sup>; 接收时每次按位接收一个字节,向对方发送应答信号,继续接收下一字节。

写时序、读时序及数据传输时序如图 3-17、图 3-18 和图 3-19 所示, 数据传输时序图中框 1 是 SDA 数据有效期, 框 2 是数据改变期。



图 3-17 MLX90614 写时序

Fig. 3-17 MLX90614 write timing



图 3-18 MLX90614 读时序

Fig. 3-18 MLX90614 reading timing

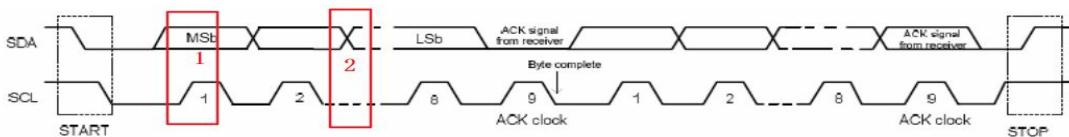


图 3-19 MLX90614 数据传输时序

Fig. 3-19 MLX90614 data transmission timing

### 3.7.2.2 测温流程

MLX90614 测温流程如图 3-20 所示。首先初始化引脚, 然后发送起始位, 再发送从机设备地址写和命令地址, 重新发送一次起始位, 再发送从机设备地址读, 然

后先读取低字节数据、高字节数据，最后发送结束位结束本次数据的读取。将读取的高字节数据( $DataH$ )和低字节数据( $DataL$ )，根据式(3.13)换算为温度 $T$ (单位为 $^{\circ}\text{C}$ )<sup>[65]</sup>。

$$T = (DataH:DataL) * 0.02 - 273.15 \quad (3.13)$$

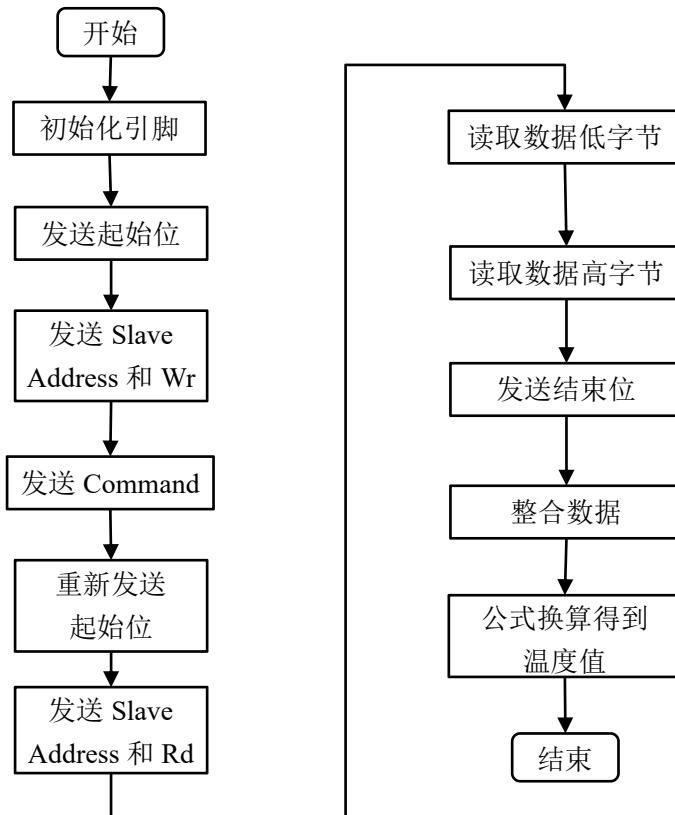


图 3-20 测温流程图

Fig.3-20 Temperature measurement flow chart

### 3.7.3 存储功能

字符分隔值(Comma-Separate Values, CSV)文件是一种纯文本形式的表格数据文件，记录之间以换行符分隔，字段间通常以逗号分隔，其具备格式简单、兼容性好和服务器响应迅速等优点<sup>[66-67]</sup>，因此本系统采用CSV文件对数据进行存储。Python中使用CSV文件的核心代码如下：

```

import csv

ap.add_argument("-o","--output",type=str,default="content.csv",
                help="path to output csv file containing barcode")
#创建 CSV 文件

```

```

csv=open(args["output"],"w")
header_list = "时间,编号,温度"
csv.write(str(header_list))
csv.write("\n")          #把内容写入 CSV 文件

```

### 3.7.4 总体流程

位置标签识别、测量温度和数据存储功能的总体流程如图 3-21 所示。

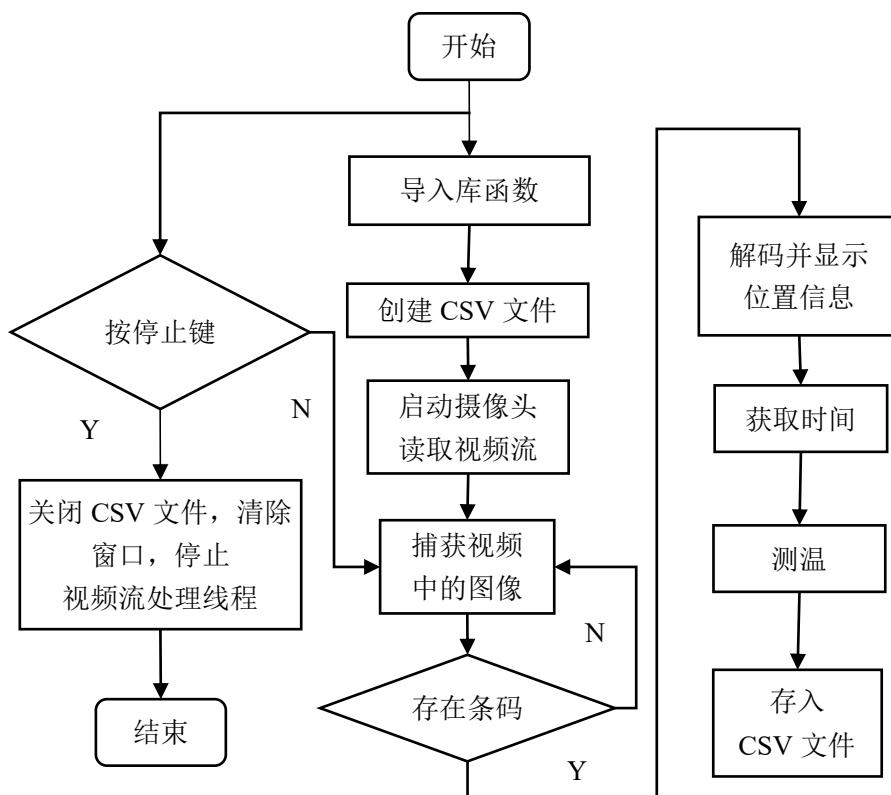


图 3-21 定位、测温和存储流程

Fig. 3-21 Location, temperature measurement and storage process

首先开始运行，导入 pyzbar、datetime、imutils 和 OpenCV 等库函数，创建 content.csv 文件。接着启动摄像头和读取视频流，捕获视频中的图像判断是否存在二维码（每个设备分配一个二维码，二维码中所含内容是编号，即可对应变电站中设备的位置信息），若存在则调用 pyzbar 进行解码，在上位机回传图像中可显示二维码编号和条码类型。温度传感器固定于舵机云台，当摄像头识别到设备信息时，传感模块也随之到达合适位置可进行温度测量，因此启用 MLX90614 测温，将获取的时间、位置和温度等信息以文本形式存储在 SD 卡中。同时，循环检测是否按下停止

键，如果是，则关闭 CSV 文件，清除窗口，停止视频流处理线程；如果否，则继续循环以上过程。

### 3.8 本章小结

本章节主要介绍了以树莓派为主控芯片的变电站巡检机器人软件功能设计。首先介绍系统开发环境搭建，阐明电机驱动和舵机驱动的原理及程序编写，实现底层控制系统设计。然后介绍视频回传部分的前期摄像头使能配置，阐述远程控制功能的用户界面编写和服务器响应过程，再次介绍自主避障功能的设计思路，并将远程遥控和避障功能通过流程图的方式展示实现过程。最后介绍设备定位、测温并自动录入数据的功能。系统采用二维码标签作为高压开关柜位置信息的载体，利用 OpenCV 和 Pyzbar 实现二维码识别以完成设备位置锁定，MLX90614 与树莓派之间通过 SMBus 协议完成对高压开关柜的温度测量并上传温度数据，运用创建 CSV 文件的方式对测温时间、测温地点和温度值进行存储。



## 4 系统搭建与测试

### 4.1 概述

根据第一章的巡检机器人背景分析和整体系统搭建，结合第二三章的软硬件设计，本章中将在实验室现有条件下完成机器人的安装调试，在如图 4-1 所示的实验样机上进行各项功能测试，对机器人的物理结构搭建以及软件程序编写的合理性进行验证，主要包括机器人的控制功能、智能避障功能以及对设备的定位测温功能等。对变电站实际环境简化处理并进行建模，在算法中载入模型测试路径规划算法的性能，以便分析是否满足变电站的巡检要求。

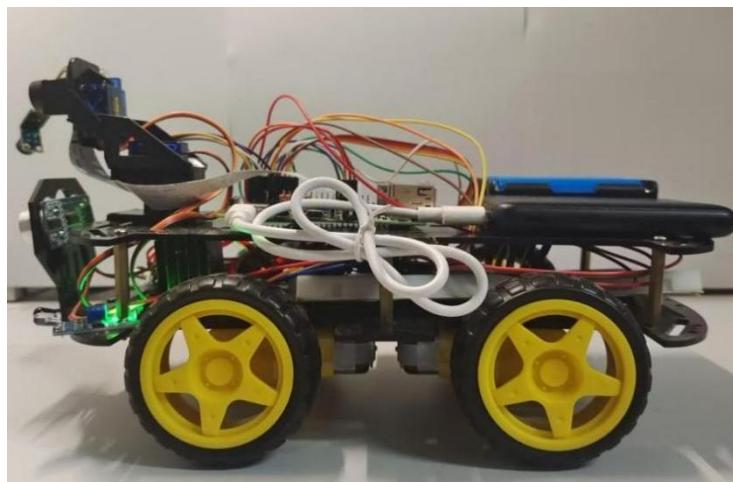


图 4-1 机器人实物图

Fig.4-1 Physical picture of robot

### 4.2 机器人移动和摄像头云台测试

机器人的主体控制程序平稳运行是后续功能实现的前提，因此优先对其进行实验测试。为主控芯片和电机驱动器上电以后，树莓派开机指示灯闪烁，L298N 亮红灯，红外避障传感模块灯亮起，摄像头启动，查看各模块的运行情况，简单调试后确认各部分运转正常，进行远程控制功能测试，图像回传效果如图 4-2 所示。

通信系统的正常运行是人机交互操作的基础，首先将客户端与系统置于同一局域网中，机器人系统开始运行后，系统开始监听 8080 端口，如图 4-3 所示，在客户端浏览器中输入网址和端口号（<http://192.168.31.75:8080>）以后进入远程控制页面，

如图 4-4 所示，页面标题为“遥控”，主体分为两部分：“Car”和“Camera”。“Car”部分有五个按钮，分别代表动作前、后、左、右和停止；“Camera”的五个按钮含义分别为：上、下、左、右和初始中间位置。

首先测试机器人的运动状态，当按下“car”部分的前进、后退或转向按钮时，机器人能够及时应答，处于当前状态，图 4-5 为树莓派接收到前进指令的反馈语句，开始完成电机的相应控制，当按下中间静止按钮时小车停止运动；其次测试舵机云台的指令响应情况，当按下“camera”部分的“L”或“R”时，控制二自由度云台水平方向的舵机向左或向右转动固定的角度，当按下“U”或“D”，控制竖直方向的舵机向上或向下转动固定的角度，图 4-6 为树莓派接收到舵机云台向上转动指令的消息，当按下“Center”时，云台转到中间位置，控制系统的具体测试结果如表 4-1 所示。

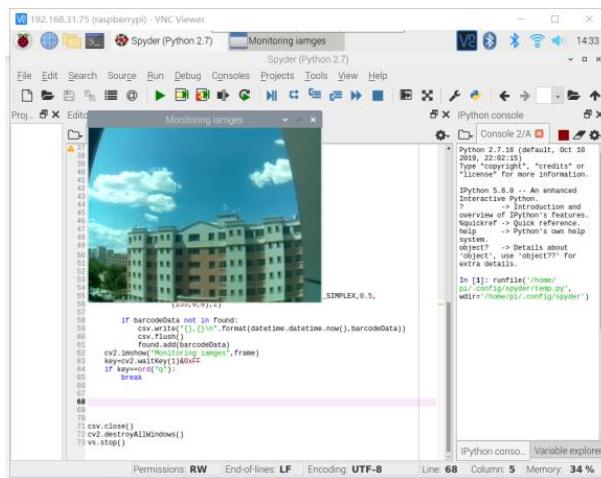


图 4-2 图像回传效果

Fig. 4-2 Image return effect

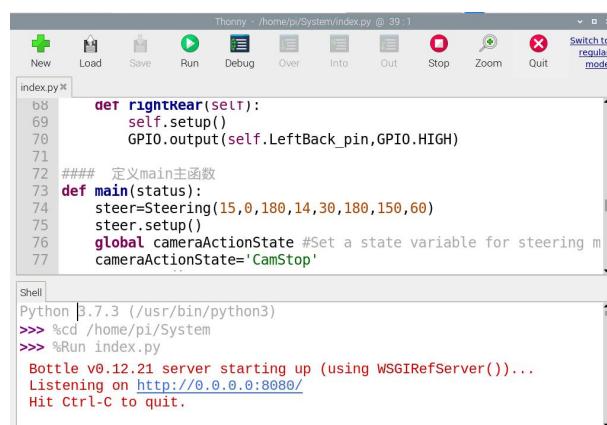


图 4-3 系统开始监听 8080 端口

Fig 4-3 The system starts listening to port 8080

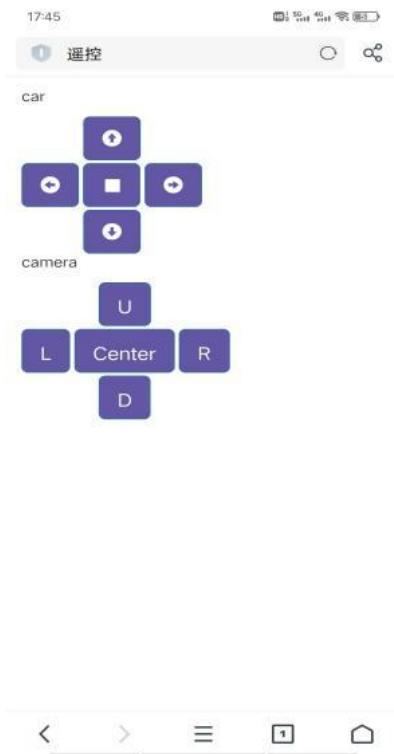


图 4-4 远程控制界面

Fig. 4-4 Remote control interface

```
Shell
192.168.31.171 - - [15/Jun/2023 10:52:40] "POST /cmd HTTP/1.1" 200
2
按下了按钮:Up
begin setup ena enb pin
setup ena enb pin over
192.168.31.171 - - [15/Jun/2023 10:52:51] "POST /cmd HTTP/1.1" 200
2
```

图 4-5 树莓派接收到机器人前进指令

Fig 4-5 Raspberry Pi Received Robot Forward Command

```
Shell
2
按下了按钮:front
begin setup ena enb pin
setup ena enb pin over
begin setup ena enb pin
setup ena enb pin over
192.168.31.171 - - [15/Jun/2023 10:50:07] "POST /cmd HTTP/1.1" 200
```

图 4-6 树莓派接收到云台向上旋转的指令

Fig 4-6 Raspberry Pi received an instruction to rotate the pan tilt upwards

表 4-1 远程遥控功能测试

Tab. 4-1 Remote control function test

测试功能	测试内容	测试结果
	左侧电机正转， 右侧电机正转	机器人前进
	左侧电机正转， 右侧电机停止	机器人右转
	左侧电机停止， 右侧电机正转	机器人左转
	左侧电机反转， 右侧电机反转	机器人后退
	左侧电机停止， 右侧电机停止	机器人静止
	水平方向舵机不动， 垂直方向舵机向上转动	云台向上旋转
	水平方向舵机不动， 垂直方向舵机向下转动	云台向下旋转
	水平方向舵机向左转动， 垂直方向舵机不动	云台向左旋转
	水平方向舵机向右转动， 垂直方向舵机不动	云台向右旋转
Center	水平方向舵机和垂直方向舵机均 处于中心位置	云台处于中心位置

为测试变电站巡检机器人的自主避障功能，在目前现有的实验室条件下进行验证。将不同数量的物体摆放于室内环境中，以模拟机器人在作业过程中可能遇到的障碍物情况，实验中放置的障碍物品数量增加来模拟路况的变化，每种情况测试 50 次并统计机器人避障成功的次数。实验结果如表 4-2 所示，从表中所列实验数据可以看出，随着地面障碍物数量的增加，即地面情况的复杂程度增加，避障成功的概率大致呈现下降趋势，但整体来看系统设计的避障策略基本达到预期功能。

表 4-2 机器人避障效果测试

Tab. 4-2 Robot obstacle avoidance effect test

障碍物数量	测试次数	成功躲避次数	避障成功率
1	50	50	100%
2	50	48	96%
3	50	49	98%
4	50	48	96%
5	50	47	94%
6	50	45	90%

### 4.3 定位和温度测试

高压开关柜的温度检测是巡检工作的重要内容，本系统用摄像头识别二维码获得位置信息，运用非接触式红外温度传感器进行测温。在实验室现有条件下对定位和测温功能进行测试，主要包括时间、位置和温度信息采集的准确性。本文设置巡检工作模拟场景如图 4-7 所示，即选用四个表面温度不同的物体模拟变电站的四个位置不同的高压开关柜设备，并在物体的表面贴有含不同位置信息的二维码标签。放置机器人于场景中开始进行功能测试。



图 4-7 温度不同的物体模拟变电站场景

Fig. 4-7 Simulated Substation Scenarios with Objects with Different Temperatures

通过在客户端操作按钮控制机器人依次到达四个物体所在位置的前方，再操纵舵机云台转动，将摄像头转至合适角度，使其能够识别到物体上的二维码标签以获得位置信息，图 4-8 所示为机器人成功识别到位置编号信息。此时温度传感器也开始运行，采集到相应物体的温度信息，再将测温时间、位置编号和温度数值按组存入 CSV 文件中。温度巡检工作结束后，可在树莓派系统中应用 LibreOffice 直接打开文件进行查看，如图 4-9 所示，也可以通过蓝牙方式传给电脑端进行查看。

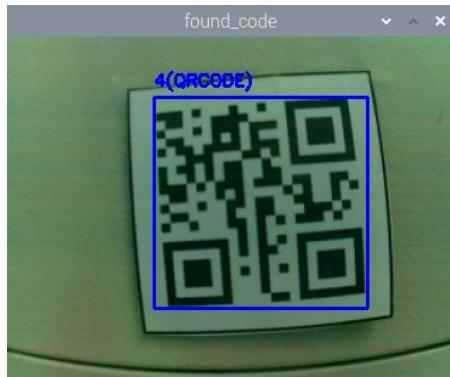


图 4-8 二维码识别结果

Fig. 4-8 QR code identification results

	A	B	C
1	时间	编号	温度
2	20221120 10:39:21	1	62.45C
3	20221120 10:45:05	2	35.93C
4	20221120 10:56:24	3	47.51C
5	20221120 11:02:33	4	18.97C

图 4-9 实验测试结果

Fig. 4-9 Experimental test results

#### 4.4 本章小结

本章首先组装所有的硬件结构和调试程序以搭建巡检机器人样机，然后对设计的系统进行相关测试。系统测试主要包括机器人运动、摄像头云台转动、视频回传效果、远程控制功能和避障功能等，对相关设计进行验证，测试结果良好；在模拟测试场景中对机器人的定位测温及存储功能进行验证，并给出实验结果，初步验证了机器人的运行可靠性。

## 5 巡检机器人路径规划算法研究

巡检机器人在完成变电站的日常工作中需要自主巡视，想要更加可靠的开展工作以及避免能源消耗，需对其工作场景进行路径规划以找到最优路线，因此路径规划成为其重要关键技术。而在实际工作场景中通常有不同的任务要求，具体可分为单目标任务巡检和多目标任务巡检。本节主要研究适应于变电站巡检机器人的路径规划算法，选用适当的建模方法建立环境地图模型，并针对两种巡检任务进行路径规划。

### 5.1 地图构建

#### 5.1.1 常用地图建模方法

在解决巡检机器人的路径规划问题前，建立环境地图模型是基础，通过恰当的方法建立反映地图参数的模型是非常关键的。常用的环境建模方法有构型空间法、四叉树分解图法和栅格地图法等。

变电站呈现整体环境静态的特点。大型变电站在建设时经过专业设计，依照功能和需求做出布局与安装，各区域划分完整，各功能区之间道路规划排列紧凑<sup>[68]</sup>。机器人工作过程中行走的路径一般都为二维平面，因此选用效率较高的栅格法进行场地建模。栅格图中存储的信息都是独立的，包含位置坐标和空间性质，白色代表自由栅格，意为不存在障碍物，黑色代表障碍栅格，意为不可通过<sup>[69]</sup>。地图经过栅格化后，场景变得简单化和规范化，路径规划问题转换为寻找栅格之间的最优路线问题，此时问题解决变得快速方便且容易实现。

#### 5.1.2 环境建模

变电站的整体建设非常复杂，如果完全比对实际环境对地图建模，数据会很庞杂，因此为便于处理，在对环境地图建模前，需对其进行简化处理，提取主要特征建立合理有效的二维地图，本文基于对变电站的环境考察，分析工作环境，建立如图 5-1 所示的变电站静态环境二维地图。由图可知，该场景中包含 500 kV 的气体绝缘金属封闭开关设备（GasInsulatedmetal. enclosedSwitchgear，GIS）、继电器室、配电间、主变压器、无功补偿装置、220 kV 的 GIS 设备、主控制楼和充电室等。地图中的空白区域为非障碍区，机器人可自由行走；非空白区域为设备和绿化等障碍区，

机器人无法自由通行<sup>[70]</sup>。

在机器人工作过程中可能会产生某一区域设备发出警告等状况，此时机器人需要快速准确地到达此位置开始上传图像信息，以便工作人员及时获知情况并采取应对措施避免情况恶化，即为单目标任务巡检。而机器人在日常巡检工作中，通常是要到达所有设备附近完成相应的任务，此时为多目标任务巡检。对建立的地图模型进行栅格化处理，将其载入算法实现两种工作场景中的路径规划仿真测试。栅格处理之后的环境地图如图 5-2 所示，栅格模型地图尺寸是  $40 \times 50$ ，将变电站二维地图中无法通过的障碍区用黑色栅格标记，可自由通行的地方用白色栅格表示。

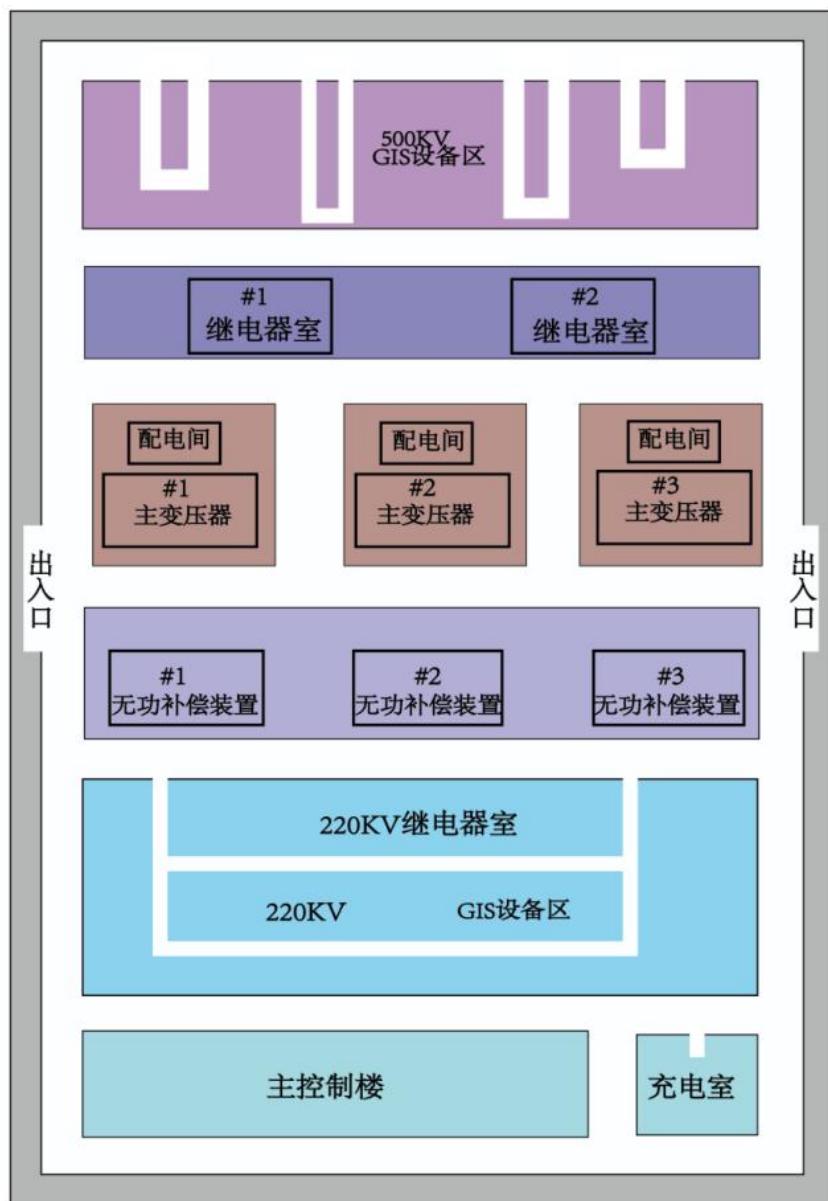


图 5-1 变电站二维地图

Fig. 5-1 Two-dimensional map of the substation

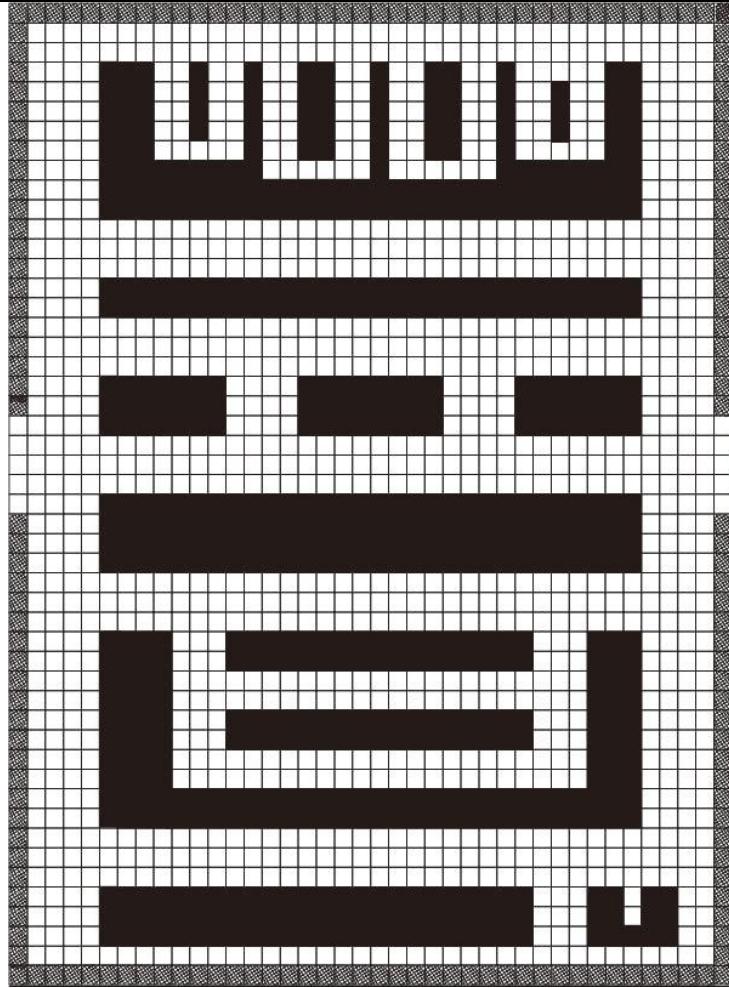


图 5-2 变电站栅格地图

Fig 5-2 Grid map of substation

## 5.2 路径规划算法

### 5.2.1 单目标任务巡检算法

广度优先搜索作为一种图遍历算法，过程中会访问与起点连通的所有节点。该算法的状态空间是“广度优先树”，逐步向外扩散，直至找到终点。Dijkstra 算法是在前述算法基础上改进，寻找节点之间的最短路径。原理是创建两个集合，一个储存已知点，一个储存未知点，从地图某一角开始遍历，找到一个节点最短路径，就把该节点放入已知点集合中，直到未知点集合变为空集，那么已知点集合中的点连接形成路线即为最短路线。Dijkstra 算法在搜索过程中针对性较低，会由于搜索到无用节点而效率不高。

最佳优先搜索算法会预先计算出每个节点到终点的距离，使用一个优先队列结

构，以每个节点到达终点的距离为优先级，每次选择到终点移动距离最短的节点作为下一遍历节点。最佳优先搜索算法在地图中存在障碍物时，规划路径结果可能路线并非最佳，效果被削弱。

A\*算法结合了前面所提到的 Dijkstra 算法和最佳优先搜索算法的思想<sup>[71]</sup>，作为静态地图中最短路最有效的直接搜索方法，非常适合于单目标任务巡检工作。其核心是函数  $f(n) = g(n) + h(n)$ ，其中  $g(n)$  是代价函数，表示从初始节点到候选节点的代价；  $h(n)$  是启发函数，表示从候选节点到目标节点的预估路程代价<sup>[72]</sup>；两者共同决定综合优先级函数  $f(n)$ 。

算法的运算过程中， $g(n)$  数值一定，因此  $h(n)$  对算法的性能产生极大地影响，通过对  $h(n)$  的合理设计可以提升 A\*算法的运算能力。 $h(n)$  的估算方法有很多种，常见的方法有：切比雪夫距离、曼哈顿距离和欧氏距离等，如公式（5.1）~（5.3）所示：

$$h(n) = \max(|x_n - x_m|, |y_n - y_m|) \quad (5.1)$$

$$h(n) = |x_n - x_m| + |y_n - y_m| \quad (5.2)$$

$$h(n) = \sqrt{(x_n - x_m)^2 + (y_n - y_m)^2} \quad (5.3)$$

A\*算法目标是搜索最短路径，即  $f(n)$  最小值的路径。如图 5-3 所示，红色栅格（3,2）设置为起点，绿色栅格（3,6）为终点，中间黑色栅格为不可通过的物体，白色区域为自由通行区域。

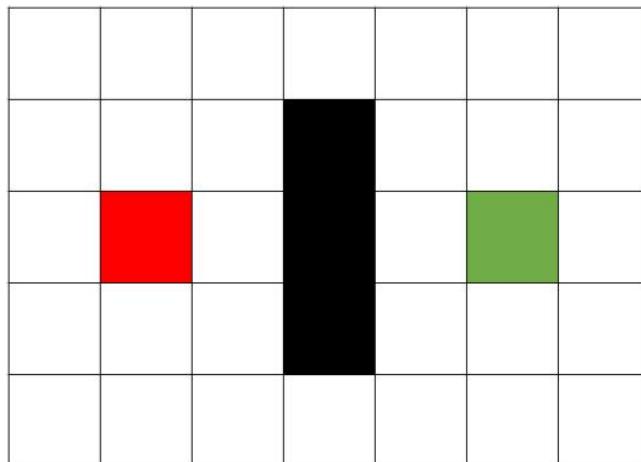


图 5-3 空间分布图

Fig 5-3 Spatial distribution map

算法有两个集合：待考察节点组成的 Openlist 和已考察过节点的 Closelist。路径搜索处理流程大致为：

- (1) 从(3,2)点开始,将该点放入Openlist中;
- (2) 查看(3,2)点相邻的自由栅格,添加到Openlist中,并把(3,2)点设置为这些栅格的父节点
- (3) 把(3,2)从Openlist移到Closelist,遍历Openlist中的节点,寻找 $f(n)$ 值最小的节点,将其视为当前要处理的节点,若当前节点是终点,结束搜索,否则将其放入Closelist;
- (4) 遍历当前处理节点的八个相邻节点,若相邻节点可通过且未在Openlist,则计算相邻节点的 $g(n)$ ;
- (5) 若相邻节点不在Closelist或 $g(n)$ 更小,更新相邻节点的 $g(n)$ ,将当前节点设置为相邻节点的父节点,计算 $f(n)$ ,将相邻节点加入Openlist<sup>[73]</sup>,不断重复此过程;
- (6) 当终点加入Openlist中,此时找到了路径;当查找终点失败且Openlist是空的,此时没有路径。

传统A\*算法的八邻域搜索方式使其出现过大转弯角度的现象,会降低机器人的工作效率,因此引入贪心算法,使得A\*算法在全局搜索过程中,更关注于局部最优解,在迭代过程中当向目标节点靠近时,根据贪心策略,得到局部最优策略,缩小问题规模,使路径更平滑并有缩短距离的效果。

### 5.2.2 多目标任务巡检算法

多目标任务巡检工作中,机器人需从充电室出发到达变电站内的所有设备附近完成一系列工作并回到充电室,意为需要经过地图模型中的全部巡检点。该问题是求从出发点经过且只经过一次全部巡视点所需的最短距离。本文用蚁群算法和A\*算法融合的方式完成多目标任务巡检工作中的路径规划问题,并对其作出改进。

蚁群算法是一种通过模拟自然界中蚁群寻找实物行为而提出的仿生学算法,最早由意大利学者Marco Dorigo等人提出,具有启发式、分布式和正反馈等基本特征<sup>[74]</sup>。蚂蚁在觅食过程中会留下“信息素”,后面的蚂蚁可以检测到此种物质,从而选择信息素含量高的某条路径,当路上经过的蚂蚁越多,信息素就会越多,最终会确定一条最短路径。

蚁群算法中包含的重要参数有:蚁群数量、最大迭代次数、启发因数、期望因子、挥发因子、信息素浓度等<sup>[75]</sup>。

首先初始化上述所有参数,蚂蚁随机散布在不同出发点,根据路径选择概率选

择下一访问点并更新禁忌表防止重复路线。传统蚁群算法的启发函数和路径转移概率公式如式（5.4）和（5.5）所示，其中： $\alpha$ 是启发因子， $\beta$ 是期望因子， $\eta(i,j)$ 是启发信息， $d(i,j)$ 是节点间的距离， $\tau(i,j)$ 是信息素浓度， $tabu_k$ 是蚂蚁经过的节点，

$$\eta(i,j) = \frac{1}{d(i,j)} \quad (5.4)$$

$$p^k(i,j) = \begin{cases} \frac{[\tau(i,j)]^\alpha * [\eta(i,j)]^\beta}{\sum_{j \notin tabu_k} [\tau(i,j)]^\alpha * [\eta(i,j)]^\beta}, & \text{if } j \notin tabu_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5.5)$$

当蚁群经过一周并释放信息素后，后续蚂蚁可能会因为残留信息浓度过高而无法选择最佳路径，所以需要设置信息素更新机制使其合理的累积与挥发，传统信息素浓度更新计算方式为：

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) * \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij} \quad (5.6)$$

$$\Delta \tau_{ij} = \sum_1^m \Delta \tau_{ij}^k \quad (5.7)$$

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_{k,ij}}, & ij \in l_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5.8)$$

其中 $\rho$ 为信息素挥发因子，则 $1-\rho$ 为残留因子， $Q$ 为信息素强度， $L_{k,ij}$ 为第 $k$ 只蚂蚁行走路径的长度。

检测当前的迭代次数是否已达到最大迭代次数，若未达到，则继续循环搜索，如果达到，则输出最优结果。

多目标任务巡检工作的路径规划算法流程如下页图 5-4 所示。  
传统蚁群算法中，在迭代初始阶段，地图上的信息素分布比较均匀，路径之间的浓度几乎无差别，蚁群难以判断方向，所以在前期较难确定一条最佳路径。因此为避免蚁群在初期盲目寻找，引入下一节点 $j$ 和目标节点 $D$ 之间的欧式距离 $d_{jD}$ 和动态权重系数进行优化，公式为：

$$\eta_{ij}'(t) = 1 / (\lambda_1 d_{ij} + \lambda_2 d_{jD})^2 \quad (5.9)$$

$$d_{jD} = \sqrt{(x_j - x_D)^2 + (y_j - y_D)^2} \quad (5.10)$$

$$\lambda_2 = 2 - e^{(B/3 - b_n)} \quad (5.11)$$

其中,  $\eta_{ij}^*(t)$  是优化后的距离启发函数,  $x$ 、 $y$  是节点的横、纵坐标,  $b_n$  为算法当前迭代次数  $n$  中最佳路径经过的巡检点数,  $B$  为地图中的总巡检点数量,  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  是动态权重系数, 初始值为 1, 满足关系  $\lambda_1 + \lambda_2 = 2$ , 随着  $b_n$  的增加,  $\lambda_2$  的权重占比提高。

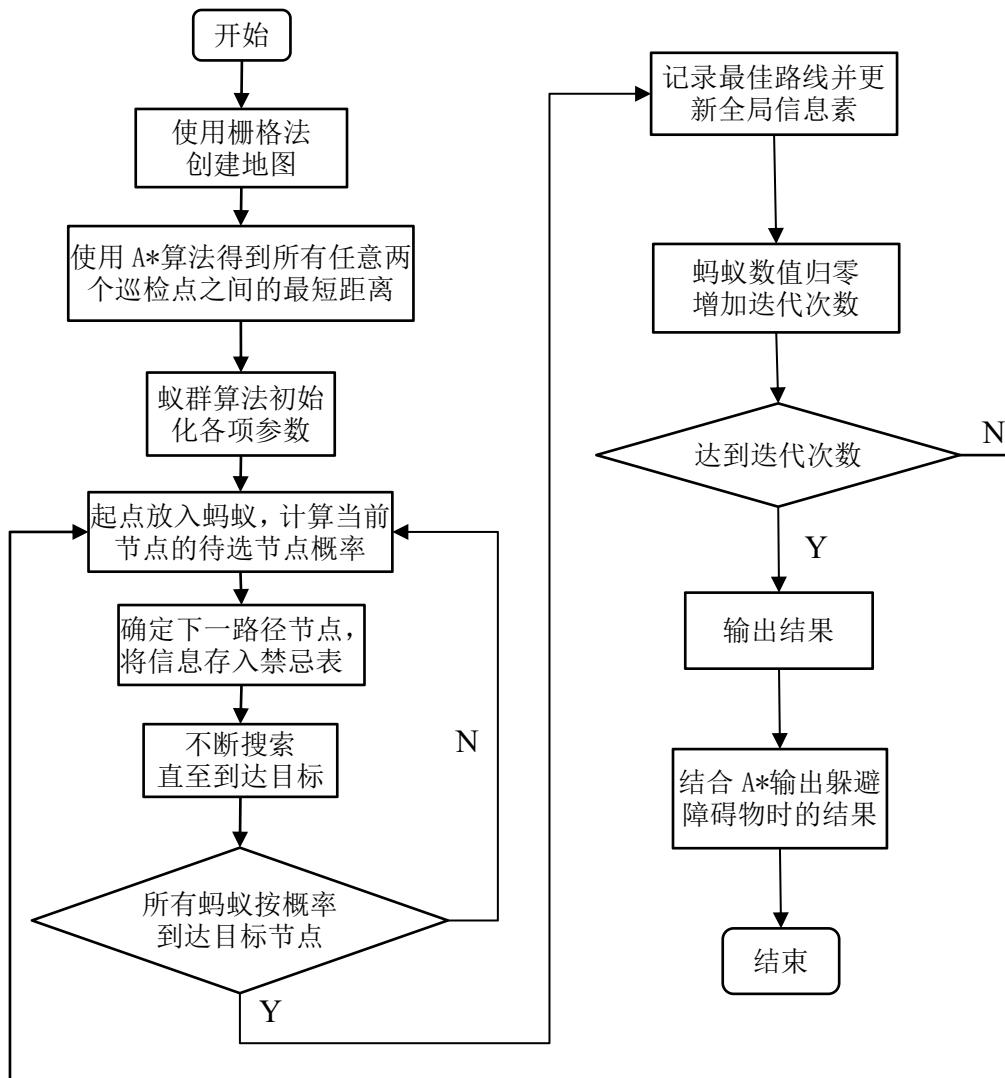


图 5-4 蚁群-A\*路径规划算法路程

Fig.5-4 Ant Colony - A \* Path Planning Algorithm Path

另外, 传统蚁群算法的启发因子、期望因子和挥发因子是不变的, 但是在算法运行过程中, 前期信息素浓度低, 信息不足, 蚂蚁寻路存在较大的随机性; 后期信息素含量变多, 又会使算法陷入局部最优, 因此设计一种因子自适应更新策略, 方式如下:

$$\alpha' = \alpha - u_0 \frac{n}{N} \quad (5.12)$$

$$\beta' = \beta - u_1^{\frac{n}{N}} \quad (5.13)$$

$$\rho' = \rho - u_2^{\frac{n}{N}} \quad (5.14)$$

其中,  $N$  为算法迭代总次数,  $u_0$ 、 $u_1$  和  $u_2$  是常量,  $\alpha'$  是改进后的启发因子,  $\beta'$  是改进后的期望因子,  $\rho'$  是改进后的挥发因子, 初始值分别为 1.2、5.5 和 0.11。启发因子、期望因子和挥发因子的变化趋势如图 5-5 所示。算法在开始阶段为让蚂蚁找到更多路径,  $\alpha'$  权占比占应较低,  $\beta'$  权重占比应较高,  $\rho'$  取值较小有利于扩大搜寻范围, 随着迭代次数增加,  $\rho'$  降低幅度大,  $\alpha'$  幅度较小,  $\rho'$  数值逐渐降低, 负反馈效果削弱, 信息素增多, 对路径选择的影响程度提升。因此改进后的蚁群算法能够降低陷入局部最优的概率, 从而提升路径规划性能。

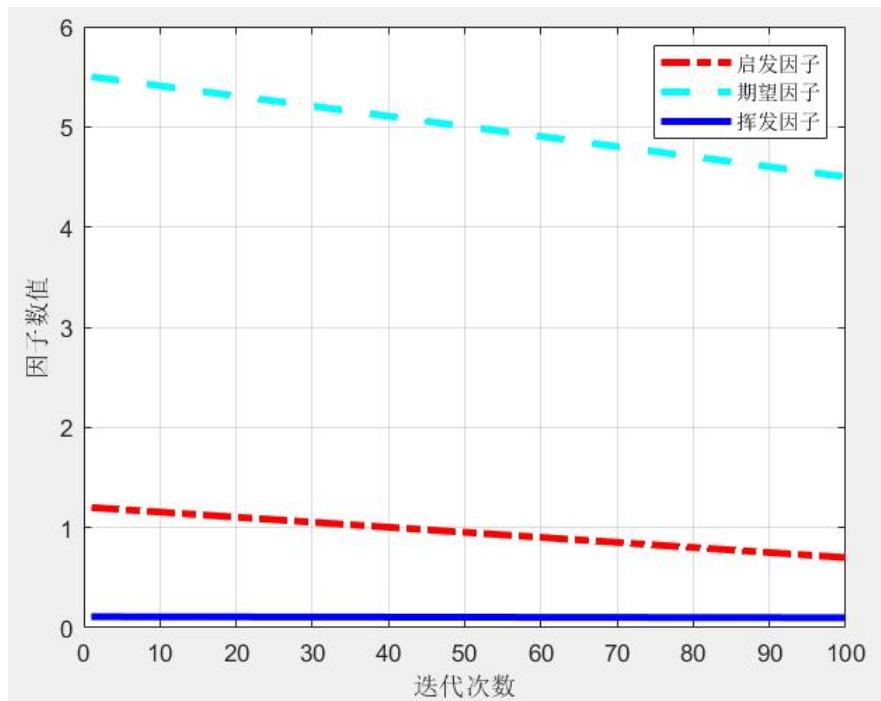


图 5-5 各因子变化趋势图

Fig.5-5 Trend of Changes in Various Factors

## 5.3 路径规划算法性能测试

### 5.3.1 单目标任务算法仿真结果

将传统 A\* 算法和改进 A\* 算法应用在栅格地图中进行仿真分析, 记录路径距离, 耗时和转弯数量, 对结果进行对比分析。仿真结果如图 5-6 和图 5-7 所示。

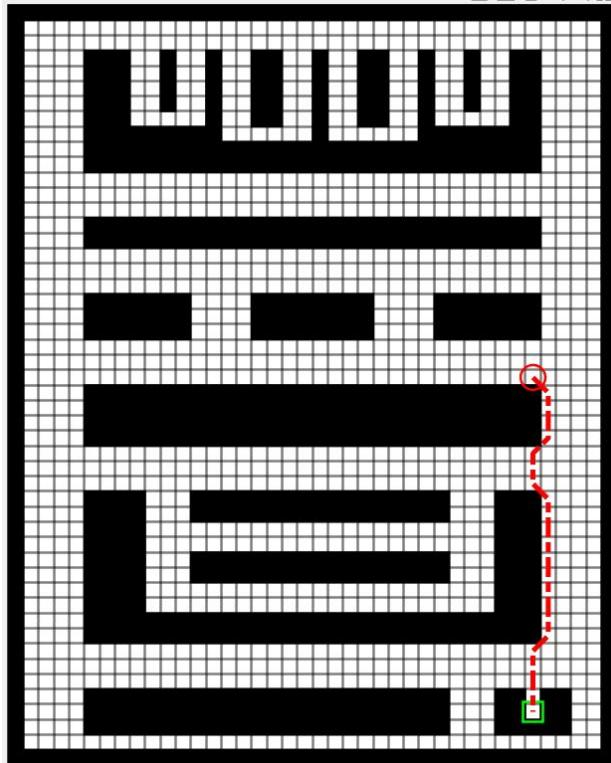


图 5-6 传统 A\*算法仿真结果

Fig 5-6 Simulation results of traditional A \* algorithm

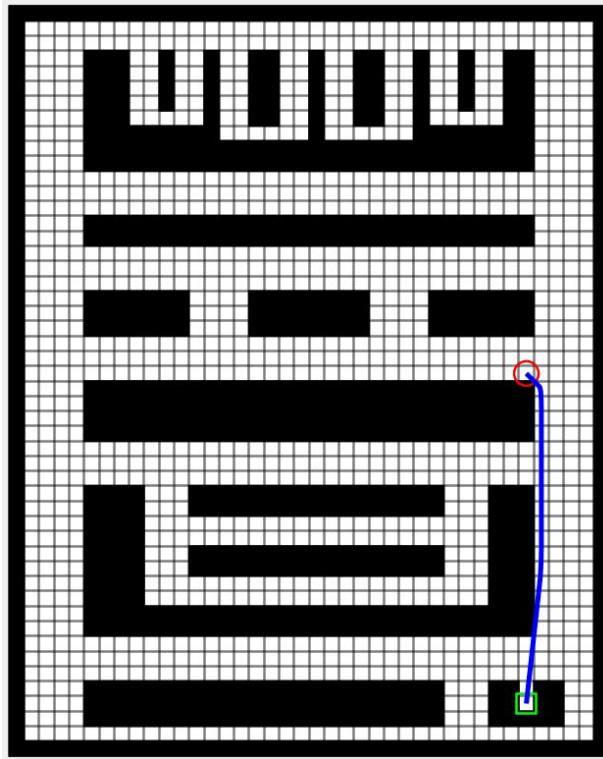


图 5-7 改进 A\*算法仿真结果

Fig 5-7 Improved A \* algorithm simulation results

实验数据如表 5-1 所示，由表可知：传统 A\* 算法应用在变电站模型中，规划出的路径距离为 23.66，耗时为 0.20s，转弯数量为 23；改进 A\* 算法规划出的路径距离为 22.47，耗时为 0.17s，转弯数量为 4。由此可得：改进后的 A\* 算法路径距离减少 5.23%，耗时减少了 15%，转弯数量减少了 82.61%。

表 5-1 单目标任务巡检路径规划实验数据

Tab.5-1 Experimental data on single target task inspection path planning

	路径距离/单位长度	时间/s	转弯数量/次
A*算法	23.66	0.20	23
改进 A*算法	22.47	0.17	4

### 5.3.2 多目标任务算法仿真结果

将蚁群-A\*算法和改进蚁群-A\*算法应用于变电站的栅格地图中，进行仿真分析。路径规划效果如图 5-8 和图 5-9 所示，算法性能对比如图 5-10 所示。

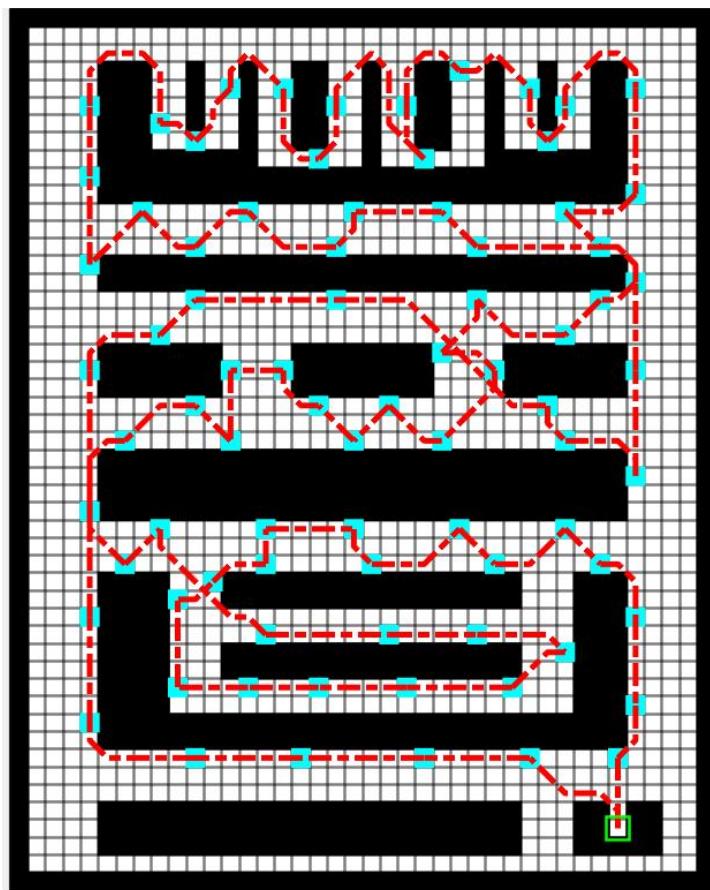


图 5-8 传统蚁群-A\*算法仿真结果

Fig5-8 Simulation Results of Traditional Ant Colony-A \* Algorithm

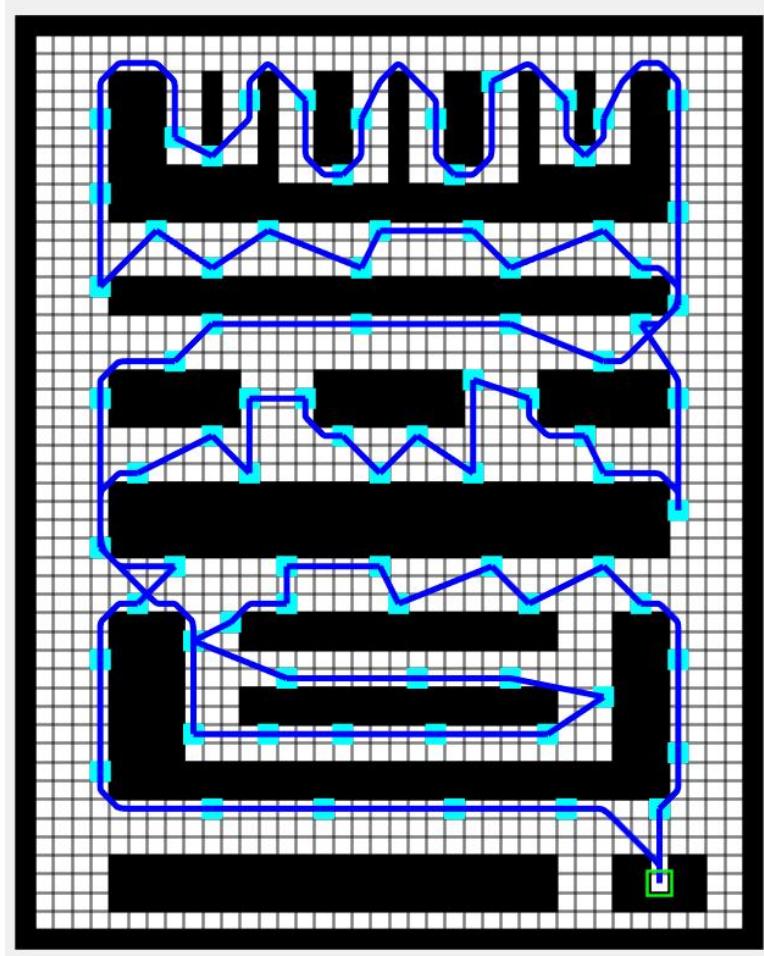


图 5-9 改进蚁群-A\*算法仿真结果

Fig 5-9 Improved Ant Colony A \* Algorithm Simulation Results

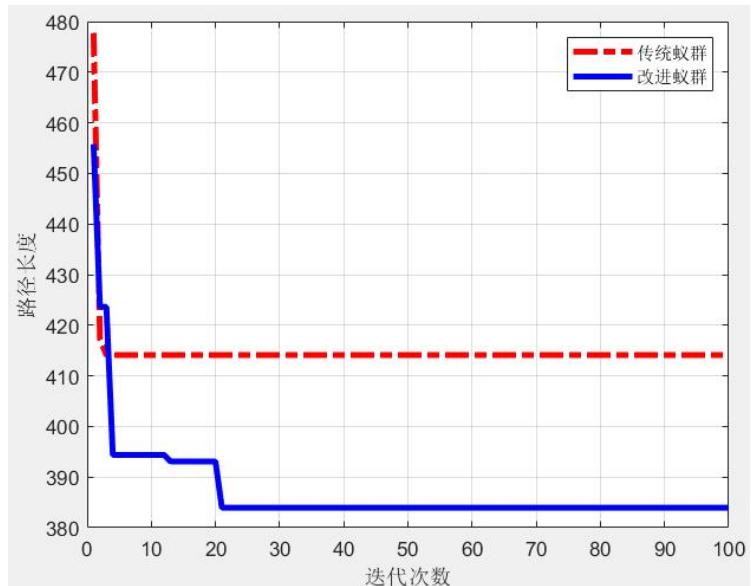


图 5-10 算法改进前后性能比较

Fig.5-10 Comparison of performance before and after algorithm improvement

实验数据如表 5-2 所示, 由表可知, 传统蚁群-A\*算法应用在变电站地图模型中, 规划出的路径距离为 402, 耗时为 1.88s, 转弯数量为 439 次; 改进后的蚁群-A\*算法规划出的路径距离为 389, 耗时为 1.61s, 转弯数量为 216 次。由此可得, 改进后的算法比传统算法规划出的路径距离减少 3.23%, 耗时减少 14.36%, 转弯次数减少 50.80%, 大大提高了路径规划的效率。

表 5-2 多目标任务巡检路径规划实验数据

Tab.5-2. Experimental data on multi-objective task inspection path planning

	路径距离/单位长度	时间/s	转弯数量/次
蚁群-A*算法	402	1.88	439
改进蚁群-A*算法	389	1.61	216

## 5.4 本章小结

本章首先采用栅格法对变电站的环境地图进行建模, 针对路径规划中的单目标任务巡检和多目标任务巡检的问题分别提出 A\*算法和蚁群-A\*算法并作出改进, 将算法分别应用于地图模型中进行仿真实验, 证明提出的改进算法对于巡检任务的路径规划效果有明显的提升作用。

## 6 总结与展望

### 6.1 总结

在中国经济取得显著成就的背后，是强大的电网做支撑。在规模增大的同时，国家对电网系统运行的稳定性和安全性也提出了更加严格的标准。电气设备在长时间运行过程中，极易产生高温现象，如果不能及时发现并采取措施，容易造成设备故障甚至发生安全事故，对人们的日常生活将会造成诸多不便，而目前采用的人工巡检方式又存在可靠性低和效率低等问题，针对此现象，本文基于模块化的设计思路分别从硬件和软件两方面考虑，研制了一款符合变电站实际需求的温度巡检机器人系统，并对路径规划算法进行了仿真分析。

文章介绍了课题的研究背景以及国内外的研究现状，对系统需求进行分析并给出解决方案，设计了机器人的整体系统框架，简要分析巡检机器人需要具体实现的功能，为后续工作提供整体思路并奠定基础。

阐述变电站温度巡检机器人的软硬件系统设计，介绍各部分的硬件选型及相关参数等，采用树莓派 4B 作为系统的主控芯片，驱动方式为四轮驱动，应用传感器为避障模块，配置电源模块，并设有远程控制端和摄像头云台等，完成以上各部分连接以实现系统硬件的搭建；介绍系统的开发环境搭建，开发巡检机器人的基本运动控制模块，实现舵机云台转动、视频回传和智能避障的功能，在底层控制系统完成的基础上编写 Web 网页和搭建 Web 服务器，实现了远程控制功能，可以人机交互。

针对变电站传统温度巡检方式中存在的问题，设计自动录入设备位置、温度和存储功能。应用二维码标签作为高压开关柜的位置信息载体，搭载 OpenCV 模块和 Pyzbar 算法对高压开关柜进行位置信息识别，再利用温度传感器实现测温并上传数据，最后将测量时间、测量地点和测量温度以 CSV 文件的形式进行存储，以便后续工作人员按照时间和地点查找设备的历史数据。

在完成系统的结构设计、硬件搭建和软件编程后，研制出变电站巡检机器人的样机，对样机进行各部分功能试验，包括机器人移动试验、摄像头云台试验、智能避障功能试验、远程控制试验和定位测温试验等，验证了设计的合理性和可行性。该机器人的应用可使变电站的管理人员及时获知各设备的运行情况，从而做出应对措施。

通过对巡检机器人工作环境的考察，选用栅格法对地图进行建模，设计适应于

单目标任务巡检和多目标任务巡检等两种工作模式下的路径规划算法并改进。通过仿真验证两种情境下的路径规划算法的效果，结果符合算法设计的预期效果，

本设计应用树莓派搭载各模块实现各部分功能，设计简洁完整，实现机器人的远程控制等功能外，可对变电站的高压开关柜进行定位、测温和存储功能，为设备的日常维护提供可靠数据支持。路径规划算法应用于变电站地图中的仿真测试取得预期效果，在不同任务中规划出最短路径，该系统预期可满足变电站的巡检需求，进一步促进了电力系统的智能化。

## 6.2 展望

未来移动机器人会更加趋于自动化和智能化，涉及到的学科种类也非常丰富，包括力学、通信和计算机等。通过实验说明理论知识的可行性，变电站巡检机器人的设计取得一定成果，但是本课题仍处于前期研究阶段，其设计受各方面限制仍然存在问题和不足需要进行深入研究以得到完善：

(1) 对巡检机器人的机械结构做进一步优化。现阶段的硬件结构只是初步设计，外观性能可做进一步调整，课题后期需对其在体积、载重和抗电磁干扰能力等方面做进一步设计和研究。

(2) 改进人机交互界面的设计。本设计中对于用户端页面设计较为简单，功能较少，为提高人机交互体验感，可通过添加功能和设计开发使得页面更加丰富，以操作机器人完成更多适应于变电站巡检场景下的工作。

(3) 提高机器人的图像识别性能及完善特殊情况的处理功能。由于机器人摄像头的聚焦问题，采集到的二维码图片可能不够清楚影响后续的图像识别问题，因此对图像的预处理过程具有重要意义，期望在接下来的工作中对此问题进行研究。

(4) 路径规划算法是在对巡检机器人的工作环境进行抽象建模后进行的研究设计，所提出的算法有待应用于实际场景，因此，在接下来的研究工作中，将应用于机器人中进行巡检路径规划。

## 参考文献

- [1]廖雯. 基于 FPGA 的变电站巡检机器人运动控制系统设计与实现[D].湖南工业大学,2018.
- [2]Xia C, Ren M, Wang B, et al. Infrared thermography-based diagnostics on power equipment: State-of-the-art[J]. High Voltage, 2021, 6(3): 387-407.
- [3]周敬嵩,俞京锋,唐圣丰等.基于移动式红外测温的变电站设备温度预警系统[J].电力科学与技术学报,2020,35(01):163-168.
- [4]章有权.高压开关柜温度在线实时监测系统研究[J].自动化应用,2021(01):80-82.
- [5]黄新波,薛智鹏,田毅,等.高压开关柜热故障预警策略及其应用[J].电力自动化设备,2019,39(07):181-187.
- [6]Wang H, Li J, Zhou Y, et al. Research on the technology of indoor and outdoor integration robot inspection in substation[C]//2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). IEEE, 2019: 2366-2369.
- [7]姚楚阳,刘爽.一种可升降式变电站室内巡检机器人控制系统设计[J].华东理工大学学报(自然科学版),2021,47(01):116-122.
- [8]施会斌. 变电站巡检机器人自动抄表研究[D].西南交通大学,2021.
- [9]汪鹏. 变电站巡检机器人系统结构设计与控制研究[D].安徽大学,2020.
- [10]李焕明. 智能机器人巡检系统在变电站的应用研究[D].广东工业大学,2020.
- [11]Menendez O, Cheein F A A, Perez M, et al. Robotics in power systems: Enabling a more reliable and safe grid[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2017, 11(2): 22-34.
- [12]Pinto J K C, Masuda M, Magrini L C, et al. Mobile robot for hot spot monitoring in electric power substation[C]//2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. IEEE, 2008: 1-5.
- [13]谢水杰. 智能巡检机器人在 500kV 变电站的应用研究[D].华南理工大学,2018.
- [14]孙宏发. 变电站智能巡检机器人的研究与探索[D].太原科技大学,2019.
- [15]Yoo J H, Kim C H, Kim D H. Mono-camera based simultaneous obstacle recognition and distance estimation for obstacle avoidance of power transmission lines inspection

- robot[C]//2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2017: 6902-6907.
- [16]Guo R, Li B, Sun Y, et al. A patrol robot for electric power substation[C]//2009 International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE, 2009: 55-59.
- [17]韩寅超. 变电站巡检机器人的设计与研究[D].南京理工大学,2021.
- [18]杨旭东,黄玉柱,李继刚等.变电站巡检机器人研究现状综述[J].山东电力技术,2015,42(01):30-34.
- [19]Xiao P, Guo R, Luan Y, et al. Design of a laser navigation system for substation inspection robot[C]//2013 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA). IEEE, 2013: 739-743.
- [20]Zeng J, Wang X, Yang J, et al. Study on inspection robot for substation based on ultra-wide-band wireless localization system[C]//2015 IEEE International Conference on Information and Automation. IEEE, 2015: 191-195.
- [21]彭向阳,金亮,王柯等.变电站机器人智能巡检系统设计及应用[J].中国电力,2018,51(02):82-89.
- [22]Zhao X, Peng Z, Zhao S. Substation electric power equipment detection based on patrol robots[J]. Artificial Life and Robotics, 2020, 25(3): 482-487.
- [23]于志浩. 室外变电站巡检机器人自主导航研究[D].西南交通大学,2021.
- [24]庄义钦. 基于视觉引导的车间 AGV 机构及嵌入式控制系统设计[D].华南理工大学,2018.
- [25]Gupta M S D, Patchava V, Menezes V. Healthcare based on iot using raspberry pi[C]//2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGGIoT). IEEE, 2015: 796-799.
- [26]陈品岚,张小花,朱立学,等.基于树莓派及深度学习的柑橘识别系统设计[J].中国农机化学报,2022,43(09):131-136.
- [27]冷晨. 基于树莓派嵌入式交通标志智能识别系统[D].东华大学,2022.
- [28]Oktarina Y, Dewi T, Risma P. The Concept of Automatic Transport System Utilizing Weight Sensor[J]. Computer Engineering and Applications Journal, 2020, 9(2): 155-163.
- [29]周娜,郭丽凤,陈浩等.基于 STM32 的智能海水油污清洁系统 [J].电子制

- 作,2023,31(03):109-111+120.
- [30] Gabriel M M, Kuria K P. Arduino uno, ultrasonic sensor HC-SR04 motion detector with display of distance in the LCD[J]. International Journal of Engineering Research and Technical Research, 2020, 9.
- [31] 苏神保,刘丹.基于 Mind+的超声波红外避障 Arduino 机器人设计[J].广东通信技术,2021,41(01):71-74.
- [32] 张佳永.基于 STM32 的小型太阳能充电系统[J].西部皮革,2019,41(10):87-88.
- [33] 宋明睿. 基于图像识别的中空纤维膜组件完整性检测系统[D].北京邮电大学,2021.
- [34] Li L, Wu L, Mei J, et al. Hardware circuit design and development of health care intelligent life system[J]. Highlights in Science, Engineering and Technology, 2022, 7: 189-194.
- [35] 屈海朋,梁飞,王清珍.基于 STM32 的非接触式红外体温测量仪的设计[J].工业控制计算机,2022,35(06):128-129+132.
- [36] 程智.一种防疫测温仪的设计与实现——基于 MLX90614 非接触式红外测温传感器[J].黄冈职业技术学院学报,2022,24(06):138-142.
- [37] 魏齐. 基于树莓派的智能家居控制系统设计与实现[D].武汉工程大学,2022.
- [38] 张策. 基于树莓派的牛舍巡检机器人系统的研究与设计[D].北方民族大学,2021.
- [39] 杨丛丛,吴涛,张安峰等.基于树莓派的无线遥控移动机器人设计及运动控制[J].软件,2020,41(02):97-101.
- [40] 高壮. 基于 Web 的自动驾驶可视化系统的开发与应用[D].广东工业大学,2022.
- [41] 许至晶 .JavaScript 在 Web 开发的应用研究 [J]. 信息记录材料,2022,23(12):242-244+248.
- [42] 胡舒席,付麦霞,李永锋等.基于 Linux 系统的高并发 HTTP 服务器设计[J].现代信息科技,2022,6(23):90-94.
- [43] 吴艳娟,王凯,程闫斌,等.摄像机二自由度转动远程控制系统设计与实现[J].实验室研究与探索,2020,39(08):56-60.
- [44] 王言军.改进蚁群算法的输电线巡检机器人避障路径规划[J].自动化与仪表,2022,37(11):44-48.
- [45] 杨渊. 基于 FPGA 的开关柜局部放电检测终端及信号处理硬件研究[D].重庆理工

大学,2022.

- [46] Jadin M S, Taib S. Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography[J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55(4): 236-245.
- [47] 管宇. 变电站设备发热分析及应对措施[J]. 电力安全技术, 2021, 23(11): 17-19.
- [48] Tiwari S. An introduction to QR code technology[C]//2016 international conference on information technology (ICIT). IEEE, 2016: 39-44.
- [49] 耿雪纯. 基于二维码的机械臂多目视觉伺服系统设计[D]. 上海电机学院, 2022.
- [50] 李伟. 复杂畸变 PDF417 条码定位与识别的研究和实现[D]. 南京航空航天大学, 2016.
- [51] 冯宇梁. 高速二维条码识别算法研究[D]. 苏州大学, 2004.
- [52] 高戈. 基于 iOS 的移动办公系统设计与实现[D]. 北京工业大学, 2018.
- [53] 孙岳康. 基于二维码密码保护技术的电子公文系统的设计与实现[D]. 西安电子科技大学, 2021.
- [54] 虢纯. 彩色二维码编码技术研究[D]. 西安理工大学, 2021.
- [55] FERANO F C A, OLAJUWON J A N K, PUTRA G. QR CODE DETECTION AND RECTIFICATION USING PYZBAR AND PERSPECTIVE TRANSFORMATION[J]. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2022, 100(21).
- [56] 陶涛. 一种对数极坐标系下的尺度不变特征点提取器及其在图像匹配中的应用 [D]. 昆明理工大学, 2016.
- [57] 王若羽. 基于 OpenCV 的自动泊车技术研究[D]. 沈阳理工大学, 2022.
- [58] Shi L, Ni H, Zhang J, et al. Design and application of QR code positioning for orbital inspection robot in high-voltage substations[C]//2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE). IEEE, 2022: 1-5.
- [59] 张英琦. 基于嵌入式的生产线场景中板材特征边识别的研究[D]. 长安大学, 2021.
- [60] 何美莹, 岳学杰, 张涛等. 红外辐射调控原理及其在热管理应用中的材料研究进展 [J]. 化工进展, 2022, 41(07): 3719-3730.
- [61] Baclawski K. The Shape of Planck's Law[J]. Journal of the Washington Academy of Sciences, 2022, 108(3): 57-63.
- [62] 廖平. 基于 STM32 的保温杯保温性能检测系统设计 [J]. 制造业自动

- 化,2022,44(01):91-95.
- [63]张日欣.基于MLX90614的非接触式体温测量系统设计[J].软件导刊,2009,8(03):105-107.
- [64]李彤,胡彧.智能定位便携式测温仪[J].传感器与微系统,2014,33(04):95-98.
- [65]郑贵林,刘丽莎.基于MLX90614的非接触式测温仪[J].自动化与仪表,2014,29(10):12-15.DOI:10.19557/j.cnki.1001-9944.2014.10.004.
- [66]刘耀钦,杨新东,袁承芬.基于Python的智慧校园CSV文件的读取方式研究[J].汉江师范学院学报,2022,42(03):22-24.
- [67]Mitlöhner J, Neumaier S, Umbrich J, et al. Characteristics of open data CSV files[C]//2016 2nd International Conference on Open and Big Data (OBD). IEEE, 2016: 72-79.
- [68]王鸿君.变电站巡检机器人路径规划算法的研究[D].东北农业大学,2022.
- [69]魏云平,强宝民,晁苏全,杨必根.基于栅格法的桥式起重机路径规划技术研究[J].机床与液压,2016,44(15):23-25+101.
- [70]白思雯.变电站巡检机器人路径规划算法研究[D].沈阳农业大学,2022.
- [71]张伟民,张月,张辉.基于改进A\*算法的煤矿救援机器人路径规划[J].煤田地质与勘探,2022,50(12):185-193.
- [72]刘美芳.基于A\*算法的智能船舶全局路径规划[D].大连海事大学,2022.
- [73]程杰,陈姚节,刘志峰.基于A\*算法优化的无人水面艇路径规划[J].科学技术与工程,2019,19(29):201-206.
- [74]范鹏飞.基于改进蚁群算法的四旋翼无人机路径规划研究[D].兰州交通大学,2022.
- [75]蔡志民.基于改进蚁群算法的电动汽车充电调度研究[D].广州大学,2022.