

杭州电子科技大学

硕士学位论文

题 目：挂式光伏清洁机器人运行监测技术研究

研 究 生 雷宇素

专 业 电子信息

指导教师 陈科明 教授

企业导师 曾佳

完成日期 2024.05.29

杭州电子科技大学硕士学位论文

挂式光伏清洁机器人运行监测技术研究

研 究 生： 雷宇素

指导教师： 陈科明 教授

2024 年 5 月

Dissertation Submitted to Hangzhou Dianzi University

for the Degree of Master

**Research on operation monitoring technology
of hanging photovoltaic cleaning robot**

Candidate: Lei Yusu

Supervisor: Prof. Keming Chen

May, 2024

杭州电子科技大学

学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名：雷宇素 日期：2024年05月29日

学位论文使用授权说明

本人完全了解杭州电子科技大学关于保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属杭州电子科技大学。本人保证毕业离校后，发表论文或使用论文工作成果时署单位名称仍然为杭州电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。（保密论文在解密后遵守此规定）

论文作者签名：雷宇素 日期：2024年05月29日

指导教师签名：陈利明 日期：2024年05月29日

摘 要

为了提高发电效率，挂式光伏清洁机器人被广泛应用于集中式光伏电站。这些电站通常建在沙漠、山地、海上等偏远地区，且规模庞大。光伏机器人的运行和故障监测、处理等工作面临巨大挑战，包括以下几点：1、需要开发物联网平台，可对设备运行状态进行远程在线监测，实现无人值守；2、需实时监测光伏机器人在行走过程中的偏斜状态，进行纠偏处理，防止机器人卡死在轨道上；3、需对机器人的位置进行在线监测，以防机器人停滞在光伏板中间，影响发电效率。

论文基于挂式光伏清洁机器人的实际应用场景，整理设计需求，开发了光伏清洁机器人控制系统和物联网管理平台。论文详细描述了 MCU 主控方案，并介绍了电机控制方案、电池管理方案及机器人无线通信机制。物联网管理平台采用微服务架构，通过 Web 端网页和移动应用程序实时监测和管理机器人的运行状态、清洁任务执行情况及数据采集，实现光伏清洁机器人的远程运维。

在清洗行走过程中，由于上下两对滚轮的摩擦力不同、光伏组件表面的差异以及电机驱动的微小差异，机器人可能会出现上下端运行速度不一致的情况。这可能导致机器人倾斜角度过大甚至卡死，严重时还会损坏机器人的电机或支架。为了实时检测和调整机器人的运行姿态，本文提出了一种基于电流数据反馈的光伏清洁机器人偏斜检测和纠偏方法。通过实时检测和分析主从电机的电流数据，获取机器人的当前姿态，并通过量子遗传 PID 算法进行纠偏。多次反馈修正后，机器人能够回正姿态，平稳行进。由于电流数据在电机运行时稳定且抗干扰能力强，通过电流数据引起的姿态误判概率较小。实验表明，完成一次纠偏的平均时间为 1.19 秒，且波动较小。

为了实时监测清洁机器人的运行位置，确保其按照预定路线进行清洁任务，并及时发现机器人停滞在光伏板中间等异常情况，本文提出了一种基于电流数据的 GRU（Gated Recurrent Unit）模型的机器人行进位置检测方法。通过分析机器人在运行过程中经过每块光伏板时的电机电流变化特征来获取位置信息。首先，获取机器人运行时的电流波形数据，然后利用 GRU 模型对波形进行学习和预测，以捕捉关键特征。接着，采用离散小波变换进行多尺度分析，以识别波形的细微特性，特别是运行过程中产生的波谷数量。根据波谷信息，通过阈值筛选出所需数据，从而准确获取机器人的位置。实验结果显示，该检测方法的准确率达 96%，表明其在实际应用中的高效性和实用性。

关键词：光伏清洁机器人，纠偏，量子遗传 PID 算法，位置检测，GRU 模型，离散小波变换

ABSTRACT

In order to improve power generation efficiency, hanging PV cleaning robots are widely used in centralized PV power plants. These power stations are usually built in remote areas such as deserts, mountains, and the sea, and are large in scale. The operation and fault monitoring and handling of PV robots face great challenges, including the following: 1. It is necessary to develop an IoT platform, which can carry out remote online monitoring of the equipment operation status and realize unattended operation; 2. It is necessary to monitor the skew state of PV robots in the process of walking in real time, and carry out deskewing processing, so as to prevent the robots from being stuck on the track; 3. To prevent the robot from stalling in the middle of the photovoltaic panel, which affects the power generation efficiency.

Based on the actual application scenario of hanging PV cleaning robot, the paper organizes the design requirements and develops the PV cleaning robot control system and IOT management platform. The thesis describes the MCU master control scheme in detail, and introduces the motor control scheme, battery management scheme and robot wireless communication mechanism. The IoT management platform adopts a microservice architecture to realize remote operation and maintenance of the PV cleaning robot by real-time monitoring and management of the robot's operation status, cleaning task execution and data collection through the Web-side pages and mobile applications.

During the cleaning walking process, due to the different friction between the upper and lower pairs of rollers, the difference in the surface of the PV module, and the slight difference in the motor drive, the robot may not run at the same speed at the upper and lower ends. This may cause the robot tilt angle to be too large or even stuck, and in serious cases, the robot's motor or bracket may be damaged. In order to detect and adjust the running attitude of the robot in real time, this paper proposes a skew detection and correction method for photovoltaic cleaning robots based on current data feedback. By detecting and analyzing the current data of the master and slave motors in real time, the current attitude of the robot is obtained, and the skew correction is performed by the quantum genetic PID algorithm. After multiple feedback corrections, the robot is able to return to a correct attitude and travel smoothly. The probability of attitude misjudgment caused by the current data is small because the current data is stable and anti-interference ability during the motor operation. The experiments show that the average time to complete one correction is 1.19 seconds, and the fluctuation is small.

In order to monitor the running position of the cleaning robot in real time, ensure that it carries out the cleaning task in accordance with the predetermined route, and discover abnormal situations such as the robot stagnating in the middle of the photovoltaic panels in a timely manner, this paper proposes a method of detecting the traveling position of the robot based on the GRU (Gated Recurrent Unit) model of the current data. The position information is obtained by analyzing the characteristics of the motor current change when the robot passes each PV panel during operation. First, the current waveform data of the robot during operation is obtained, and then the waveform is learned and predicted using the GRU model to capture the key features. Next, a multi-scale analysis is performed using discrete wavelet transform to identify the subtle characteristics of the waveforms, especially the number of wave troughs generated during operation. Based on the wave valley information, the required data is filtered by thresholding to accurately obtain the robot's position. The experimental results show that the accuracy of the detection method is as high as 96%, demonstrating its efficiency and practicality in practical applications.

Keywords: Photovoltaic cleaning robot, deflection correction, quantum genetic PID algorithm, position detection, GRU model, discrete wavelet transform

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	II
目 录	IV
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 光伏清洁机器人研究现状	2
1.2.2 光伏清洁机器人运行监测技术研究现状	6
1.2.3 光伏清洁机器人纠偏的研究现状	7
1.3 研究内容与章节安排	9
第 2 章 光伏清洁机器人控制系统和物联网管理平台设计与实现	11
2.1 系统总体设计	11
2.1.1 使用环境及技术要求	11
2.1.2 整体系统设计	12
2.2 光伏清洁机器人控制系统设计	14
2.2.1 电机控制方案设计	17
2.2.2 电池管理方案设计	19
2.2.3 机器人通信方案设计	20
2.3 机器人物联网管理平台开发	22
2.3.1 WEB 管理端设计	24
2.3.2 APP 应用程序设计	26
2.4 系统展示图	27
2.4.1 设备端展示	27
2.4.2 Web 端展示	28
2.4.3 APP 应用程序展示	29
2.5 本章小结	30

第 3 章 基于电流数据反馈的光伏清洁机器人偏斜检测和纠偏方法	31
3.1 清洁机器人偏斜原因分析	31
3.2 清洁机器人运行姿态实时检测及纠偏方法	32
3.3 基于电流数据反馈的光伏清洁机器人偏斜检测和纠偏方法	35
3.4 基于电机电流数据反馈的机器人姿态实时监测方案	36
3.4.1 电机电流监测	36
3.4.2 限位装置	39
3.5 基于量子遗传 PID 控制算法纠偏	40
3.5.1 PID 控制算法	40
3.5.2 量子遗传算法	42
3.5.3 量子遗传 PID 控制算法	43
3.5.4 纠偏执行	44
3.6 实验结果分析	46
3.7 本章小结	47
第 4 章 基于电流数据 GRU 模型的机器人行进位置检测方法	48
4.1 位置监测方法研究及分析	48
4.2 数据采集与处理	49
4.2.1 数据采集和存储	49
4.2.2 数据处理	51
4.3 GRU 模型预测波形	52
4.3.1 GRU 模型原理	52
4.3.2 GRU 模型建模	53
4.4 离散小波变换	55
4.5 阈值法分析位置	57
4.6 实验结果分析	57
4.6.1 GRU 模型预测波形实验结果	57
4.6.2 位置检测实验结果	58
4.7 本章小结	61
第 5 章 总结与展望	62
5.1 全文总结	62

5.2 未来的工作展望	62
致谢	64
参考文献	65
附录	69

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

运用可再生能源，不仅符合社会可持续发展的理念，而且在一定程度上缓解了随着全球人口增长和工业化的加速对传统能源的消耗以及降低了使用传统能源对环境造成负面影响^[1]。许多国家和地区都在政策和法规上采取措施，加大力度促进可再生能源的发展和利用，光伏发电就是其中之一^[2]。

通过推动光伏技术的研究和应用，从而实现能源的可持续利用，降低对有限资源的依赖，促进经济和社会的可持续发展是历史发展的新趋势，有着政策的支持和市场需求的增加推动了光伏技术的不断创新和应用，光伏技术在过去几十年中取得了显著的进步，包括太阳能电池的效率提高、制造成本的下降以及材料科学的创新。如图 1.1，截至 2023 年 12 月底，全国太阳能发电的装机容量约为 6.1 亿千瓦，占比约 21%，且呈持续增长态势^[3]。这表明在这一年中，太阳能发电领域经历了显著的增长，对全国电力工业的贡献得到了显著提升，这也反映了社会对可再生能源的日益重视和太阳能发电技术的不断发展^[4]。

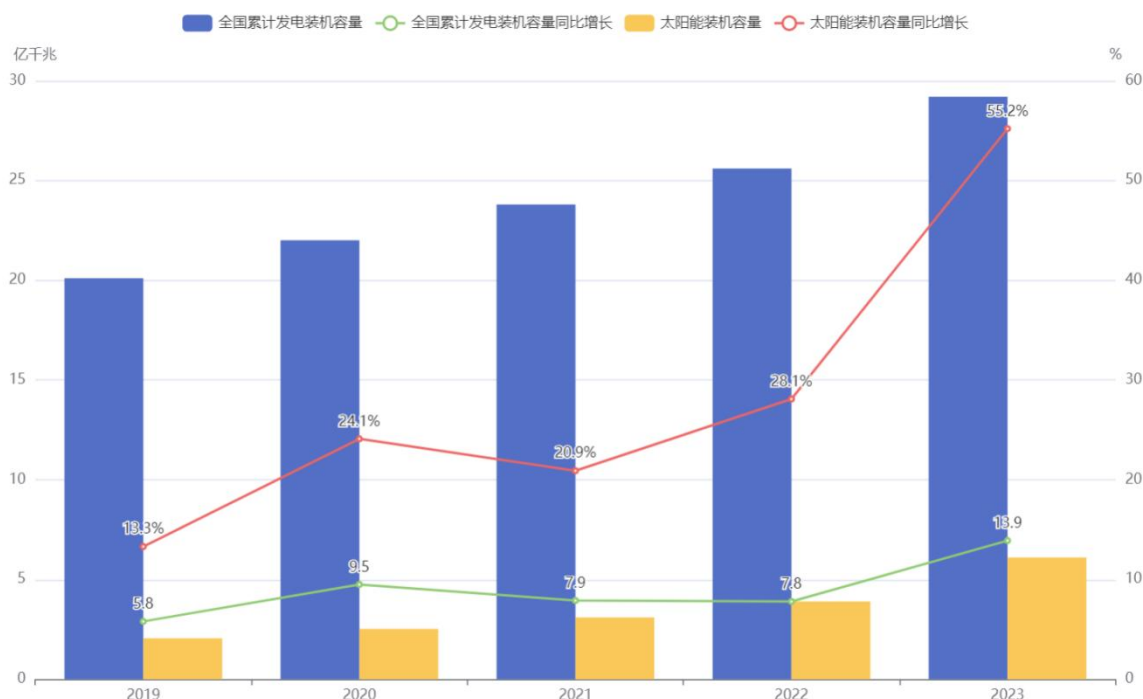


图 1.1 2019-2023 年全国累计发电装机容量和太阳能装机容量及同比增长

作为替代传统能源的清洁能源，光伏发电的发电效率是最重要的因素，良好的发电效率是决定其能否取代传统能源的关键所在。在光伏电站中，支架是安装在地面或其他支撑结构上，主要作用是提供一个坚固的结构，以支持和固定光伏组件。这样可以确保光伏组件能够安全地固定在所选的位置上，不受外部环境的影响，如风、雨、雪等。同时支架的

设计和安装位置可以影响光伏组件的倾角和朝向，从而影响能够捕获到的太阳辐射能量。通过调整支架的角度，可以最大程度地确保光伏组件始终暴露在最有利的日照条件下，提高发电效率^[5]。而在多光伏组件排列的光伏电站中，支架的位置和高度也可以影响光伏组件之间的阴影效应。通过合理设计支架的排列方式，可以降低阴影对光伏组件的影响，提高整个系统的发电效率。支架又分为固定支架与跟踪支架，其中跟踪支架可以通过程序控制，实时的调整光伏板的角度，以获取最大的采光，有效的解决太阳辐照强度、光伏温度、阴影效应、光伏组件的朝向与倾角等一系列影响光伏发电的自然因素^[6]。由于光伏电站普遍架设在开阔的室外，由此出现了光伏板灰尘堆积问题，也极大的影响着这光伏电站的发电效率，传统的人工方式虽然可以有效的清洁光伏板的灰尘，但随着光伏电站的规模扩大，以及现在的大型光伏电站大多设置在荒凉的戈壁等地方，这极大的提高了人工维护的成本，由此光伏清洁机器人应运而生^[7]。

光伏清洁机器人的出现不仅有效的去除了光伏板表面的灰尘，污垢和附着物，提高了光伏电站的发电效率，同时延长了光伏板的寿命，降低了光伏电站的维护成本，提高了电站的运行效率。并且清洁机器人通常采用环保的清洁方法，减少了水资源的浪费，使得光伏电站，同时可采用光伏发电作为动力源，符合环保与可持续发展的理念^[8]。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 光伏清洁机器人研究现状

无论是集中式光伏电站还是分布式光伏电站，都部署在远离人群、环境恶劣的地方。在长时间没有受到清洗的情况下，灰尘、油污、鸟粪等会随着时间在光伏组件表面堆积，严重影响了整个光伏系统的发电效率和经济效益。

根据相关研究^[9-12]，如图 1.2 当光伏组件上的灰尘量达到 5g/m^2 时，其发电效率为无灰尘时的 93%；当光伏组件上的灰尘量达到 15g/m^2 时，其发电效率为无灰尘时的 79%。以 100MW 新建集中式电站为例，当灰损到 8% 时，每年会带来 1280 度电损失，约 384 万元，25 年全生命周期约为 9500 万元收益损失。当灰尘不断的在光伏板面上积累，对太阳辐射的阻碍也越来越强，光伏组件所能利用的太阳辐射量也越来越少，造成热量累积，导致热斑效应的产生，严重情况下光伏组件会因温度过高而烧坏，给光伏电站造成巨大的经济损失。因此，定期清理光伏组件具有重大意义。

100MW 新建集中式电站

8%灰损每年带来1280万度电损失，约384万元，25年全生命周期约**9500万元**收益损失；

10MW 新建分布式电站

8%灰损每年带来88万度电损失，约53万元，25年全生命周期约**1325万元**收益损失；

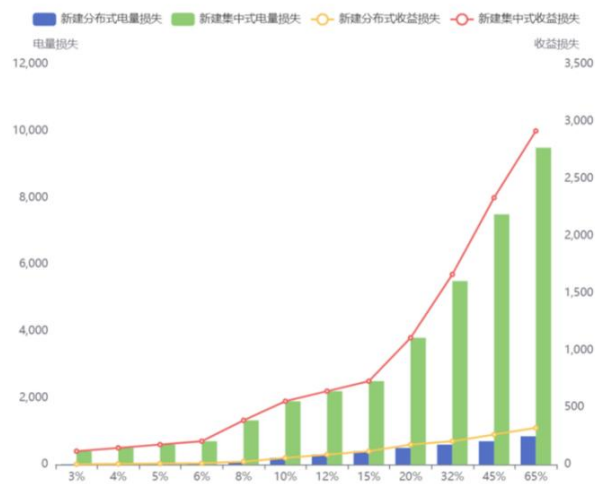


图 1.2 灰损对电量和收益的影响分析图

人力清洗的成本高昂，因此国内外众多机构对光伏清洁机器人的开发进行了深入研究，主要分为：移动光伏清洗车，履带式清洁机器人和挂式清洁机器人^[13]。

1、移动光伏清洗车

如图 1.3 所示，工作人员通过控制大型车载上相应的清洁工具进行清洗。虽然减少了人员数量，但还是需要由人去操控，增加了成本。并且由于车身较为庞大，对光伏板布局的间距和安装的地形也有一定要求^[14]。



图 1.3 光伏清洗车

2、履带式光伏清洁机器人

履带式光伏清洁机器人是一种小型的光伏清洁机器人，类似于智能小车上搭载了光伏清洁工具。由于其轻便小巧的特点，大多运用于分布式光伏电站的清洗。图 1.4 展示的履带式光伏清洁机器人是一种设计紧凑、便于携带和操作的清洁设备，旨在解决光伏板清洁的便捷性和灵活性问题。这种机器人通常采用轻量化材料制造，具有自主导航和智能清洁功能，可以快速部署到各种光伏系统中进行清洁工作。其主要优点包括灵活性高、操作便捷、适用范围广泛，可以适应不同类型和规模的光伏电站，同时减少人工操作的需求，提

高清洁效率。然而，履带式光伏清洁机器人的清洁能力可能不如固定式机器人，而且机器人可能面临电池寿命、移动稳定性、路线规划等方面的挑战，需要不断优化和改进。



图 1.4 履带式光伏清洁机器人

3、挂式光伏清洁机器人

如图 1.5 展示的是一种挂式光伏清洁机器人，它被安装在光伏板的轨道上，并通过沿着轨道运行来进行清洁任务。虽然安装成本较高，但这种机器人主要适用于大型集中式光伏电站。但是，当前主要存在的挑战之一是缺乏相应的监控手段，这导致在机器人出现故障时无法及时通知进行处理^[15]。



图 1.5 挂式光伏清洁机器人

光伏清洁机器人的崛起标志着光伏电站运维管理进入了一个新时代。作为光伏电站的第四大核心组件，清洁机器人的出现显著提升了光伏板的发电效率和电站的经济效益。特别是在那些地形复杂、人迹罕至的光伏电站，挂式光伏清洁机器人以其独特的优势，成为了清洁作业的首选。根据表 1.1 的优缺点对比，挂式光伏清洁机器人的设计充分考虑了光伏电站的特殊环境和需求。它们能够在高空中稳定运行，通过悬挂在光伏板上方的轨道进行移动，有效避免了地面障碍物的干扰。这种设计使得机器人能够在恶劣的气候条件下，如沙尘暴、高温、高湿等环境下，依然保持高效的清洁作业，确保光伏板始终保持最佳的发电状态。

表 1.1 不同类型机器人优缺点对比

机器人类型	适用场景	优点	缺点
挂式机器人	大型地面电站	效率高，可跨排清洁	结构复杂，跨排清洁时运行稳定性待提升
	渔光互补电站		
	农光互补电站		
	大型分布式电站		
履带式机器人	小型分布式电站	灵活便携	不可跨排,效率较低，清洁速度慢
移动清洁车	大型地面电站	结构简单、效率较高、可跨排清洁	路面平整度要求高，可能造成组件损坏

此外，挂式光伏清洁机器人的智能化功能，如自动巡航和远程操作，极大地提高了电站的管理效率和作业安全性。机器人可以按照预设的程序自动完成清洁任务，同时将清洁数据实时上传至云平台，供管理者进行分析和决策。这种智能化的运维方式不仅减少了人力成本，还提高了清洁作业的响应速度和准确性。

为减少成本，在单排挂式机器人基础之上，设计了机器人转运车，实现在机器人可以完成对如图 1.6 的多排光伏组件的清洗。

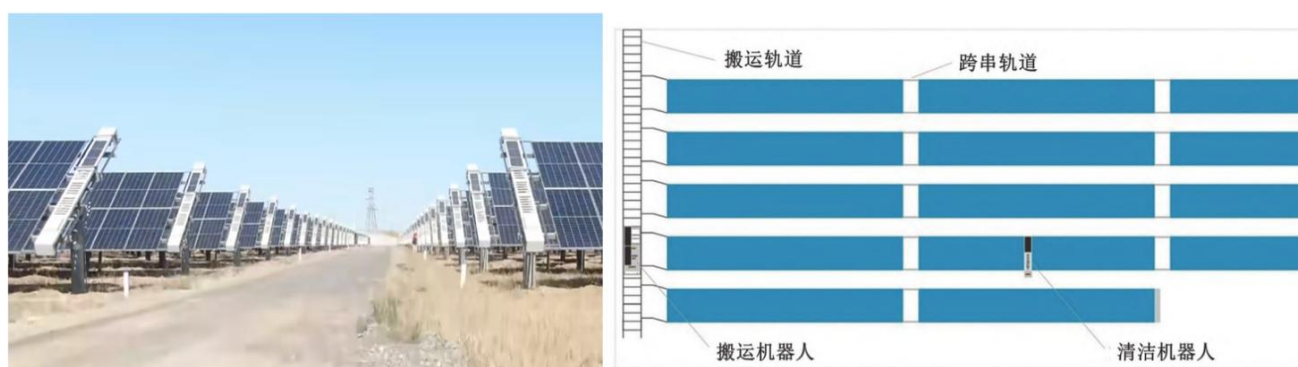


图 1.6 多排挂式光伏清洁机器人

综合来看，光伏清洁机器人的引入，不仅提升了光伏电站的自动化水平，也为光伏产业的可持续发展提供了坚实的技术支持。随着技术的不断进步清洁机器人将在光伏电站的高效、智能化管理中发挥更加关键的作用。

市场对光伏清洁机器人的需求量大，并且逐年提升。如表 1.2 所示，市场上参与企业有：以色列的 Ecoppia Scientific Ltd、思拓新能源科技有限公司、合肥仁洁智能科技有限公司、杭州舜海光伏科技有限公司、上海伟匠机器人科技有限公司、深圳怪虫机器人有限公司、厦门兰旭科技有限公司、杭州轨物科技有限公司等。其中杭州轨物科技有限公司是一家专业从事嵌入式、物联网、人工智能等数字技术研发，为企业客户提供成熟的光伏清洁机器人的智能控制硬件和物联网平台解决方案，包括挂式机器人和履带式机器人解决方案。

表 1.2 企业光伏清洁机器人研究概况

公司名称	所在地	官网链接	产品特点	技术优势
Ecoppia Scientific Ltd	以色列	https://www.ecoppia.com/	机器人配备远程监控系统，用户可以通过智能设备实时监控清洁状态和机器人的工作情况	机器人在清洁过程中采用温和的清洁技术，避免对太阳能板表面造成损伤
思拓新能源	河北廊坊	http://www.solbrighttech.com/	智能清扫机器人，清扫效率 99.5% 以上，提升发电效率 7%-25%	适用于不规则阵列排布，优化总成本，提供研发投入和品质保障
蓝旭科技	厦门	https://www.solar-lit.cn/	全自动水免费清洁机器人，IP65 防护等级，模块化设计	轻量化、无损伤组件表面，强障碍克服能力，适用于多种支架
仁洁智能	合肥	https://www.sunpuretech.com/	光伏智能清扫机器人，便携式清扫机器人，智慧光伏运维云平台	精准导航，独立路径规划，高清洁效率，快速充电
舜海光伏机器人	杭州	https://shunhai.com/	基于智慧云的光伏组件智能清洁机器人，高清洁效果和高可靠性	自主知识产权，克服轨道式清洁技术难题
伟匠机器人	上海	http://www.wj-robot.com/	光伏板清洗机器人，玻璃幕墙清洗机器人，自动化控制系统	自主研发能力，实用可靠的工业机器人
怪虫机器人	深圳	https://www.kwunphi.com/	光伏清洁机器人，感知定位和决策判断能力，多场景适用	高精度视觉定位，毫米级视觉引领，毫秒级纠偏护航
杭州轨物科技有限公司	杭州	https://thingcom.com	提供挂式机器人、履带式机器人的电控和物联网解决方案	一站式软硬件整体解决方案，可交付知识产权

此外，除了企业参与外，高校也在积极研究光伏清洁机器人，主要有兰州理工大学、天津理工大学、贵州大学、浙江大学、杭州电子科技大学。其中，杭州电子科技大学团队通过其在嵌入式系统、人工智能等领域的优势，自主研发了挂式光伏清洁人和履带式光伏机器人的电控和物联网远程监测系统，其研究成果已经在多家企业实现了产业化应用。同时为光伏清洁机器人技术的创新和应用提供了宝贵的学术支持和人才培养。通过与合作，共同推动光伏清洁机器人技术的进步，满足市场对清洁能源的不断增长的需求。

1.2.2 光伏清洁机器人运行监测技术研究现状

在光伏清洁机器人的道路识别中，传统方法通常采用多种技术来确保机器人能够准确地识别其行进路径，下面将探讨其中一些常见的方法：

(1) 图像识别，通过对机器人所处环境的图像进行分析和处理，识别出道路的位置和特征。这种方法通常包括以下步骤：首先，机器人搭载摄像头或传感器设备，实时采集周围环境的图像数据；然后，利用计算机视觉技术对图像进行处理和分析，提取道路的特征信息，如道路边界、线条、颜色等；最后，通过算法判断道路的位置和方向，指导机器人进行相应的行驶和操作^[16, 17]。

(2) 轨迹跟踪，根据预先设定的轨迹路径，通过发出控制指令来引导机器人沿着指定轨迹行驶^[18]。该方法的基本思路是根据预先选取的特征，并将其与预设的轨迹进行比对和分析，从而得出机器人与参考轨迹之间的误差。然后，利用控制算法计算出相应的控制指令，调整机器人的方向和速度，使其尽可能地沿着预定轨迹行驶。与路径跟踪不同，轨

迹跟踪要求机器人与参考轨迹之间的误差尽可能小，并且参考轨迹是关于时间的函数，因此需要更加精准和实时地调整机器人的行驶路径^[19]。通过轨迹跟踪方法，光伏清洁机器人可以更加准确地执行清洁任务，提高清洁效率和工作精度。

(3) 机器学习，利用大量的数据和算法来训练模型，以自动地识别道路及其特征。这种方法通过收集道路图像、激光雷达数据等传感器信息，然后将这些数据输入到机器学习算法中进行训练，使模型能够学习道路的形状、纹理、颜色等特征^[20]。一旦模型训练完成，它就可以在实时环境中对新的道路进行识别，从而指导光伏清洁机器人的行进路径。机器学习方法的优势在于可以适应不同的道路条件和环境变化，并且随着数据量的增加和算法的改进，模型的性能和准确性也会不断提高。

在光伏清洁机器人的道路识别技术中，图像识别、轨迹跟踪和机器学习是三种常见的方法。如表 1.3 所示，每种方法都有其独特的优势和应用场景。然而，针对光伏清洁机器人在无人区和地势险要的光伏电站中运行的特点，轨迹跟踪方法似乎更加符合目标需求。轨迹跟踪方法通过预先设定的轨迹路径来引导机器人行驶，它能够确保机器人与参考轨迹之间的误差最小化，这对于光伏清洁机器人在复杂地形中的精确作业至关重要。通过实时调整机器人的方向和速度，轨迹跟踪不仅提高了清洁效率，还提升了工作精度，确保了光伏板的清洁质量。此外，轨迹跟踪的精准性对于光伏电站的高效运维管理尤为重要。通过精确地控制机器人沿着预定轨迹行驶，可以最大程度地减少对光伏板的潜在损害，同时也降低了因误操作导致的停机风险。这对于位于偏远地区的光伏电站来说尤为重要，因为这些地区的维护成本和难度通常较高。

表 1.3 机器人运行监测方法对比

方法	优势	局限性	成本和资源消耗
图像识别	实时性高；适用于各种复杂环境和路况	对图像质量和环境光线敏感	较高
轨迹跟踪	能够按照预设的轨迹精确引导机器人行驶；适用于需要严格控制路径的场景	要预先设定轨迹路径，对路径规划和更新要求较高	低
机器学习	应对多样化道路环境；识别准确度和性能可持续提升	训练过程较为复杂和耗时；泛化能力有限	较高

综上所述，轨迹跟踪方法因其高精度和实时调整能力，在光伏清洁机器人的道路识别技术中占据了重要地位。它不仅满足了光伏电站对于清洁效率和精度的要求，还适应了复杂多变的户外环境，是实现光伏电站自动化清洁的关键技术之一。

1.2.3 光伏清洁机器人纠偏的研究现状

随着光伏发电系统规模的不断扩大和清洁作业的需求增加，如何确保光伏清洁机器人能够稳定、精准地行走在光伏板上成为了研究的重点之一。机器人纠偏是指在自动化控制系统中，通过算法或控制策略对机器人的路径或位置进行动态调整，以确保其按照预定轨迹准确移动或在执行任务时保持预期的姿态和方向^[21]。PID 控制是在工程领域中广泛采用

的一种经典方法，最早在 1922 年由俄国工程师 Nikolay Minorsky^[22]提到了 PID 控制算法的概念，将 PID 控制理论应用于自动控制系统，此后，积分和微分控制概念也被逐渐引入。最主要的缺点之一是参数调节的困难性，由于 PID 控制器的性能高度依赖于参数的准确设置，因此在实际应用中需要经过大量的试验和调整来找到最佳参数组合。Ziegler 等^[23]在 1942 年提出了一种著名的 PID 控制器参数调整方法，极大地促进了 PID 控制器的实际应用和普及。该方法通过试错法来调整 PID 参数，因此可能需要较长的时间来找到合适的参数值，特别是对于复杂的系统或需要较高性能的系统。Aström 和 Hägglund^[24]提出了自适应 PID 控制的概念和方法，使 PID 控制器能够根据系统动态特性自动调整参数。在自动调整的过程可能会受到外部干扰或系统非线性影响，导致参数调整的不稳定性和难度增加。在中国，2000 年对数字 PID 控制器进行了深入研究，提出了基于模糊逻辑、遗传算法等新兴技术的数字 PID 控制方法，为数字化控制技术的发展做出了重要贡献^[25]，在设计和调节过程相对复杂，需要精确的模糊规则和合理的隶属函数设置。2010 年后，基于改进粒子群优化算法的自适应 PID 控制方法，用于解决复杂系统控制中的参数调节问题^[26]。

随着光伏发电系统的规模化和清洁作业需求的增长，确保光伏清洁机器人在光伏板上稳定精准行走的重要性日益凸显。机器人纠偏技术的核心在于通过有效的算法或控制策略，对机器人的行进路径和位置进行实时动态调整，以维持其在预定轨迹上的准确移动和作业。表 1.4 所示，展示了不同 PID 控制算法在多个方面的优劣势。传统的 PID 控制算法虽然在工程领域得到了广泛应用，但其性能高度依赖于参数的精确设置，这在实际操作中往往需要大量的试验和调整。随着技术的发展，自适应 PID 控制、基于模糊逻辑和遗传算法的数字 PID 控制方法等相继被提出，以解决参数调整的复杂性和系统非线性带来的挑战。然而，这些方法在设计和调节过程中仍然存在一定的复杂性。量子遗传 PID 控制算法结合了量子计算和遗传算法的优势，提供了一种新的解决方案。它不仅能够处理高维参数空间，还能通过量子叠加和量子测量等操作，实现更快速的全局最优解搜索。这种方法的高效性和快速收敛特性，使得量子遗传 PID 控制算法在光伏清洁机器人的纠偏应用中表现出更高的性能和适应性。

表 1.4 不同 PID 控制算法对比

PID 控制算法	精度和稳定性	抗干扰能力	鲁棒性和适用范围
传统 PID 控制算法	良好	一般	适用于大多数线性系统和部分非线性系统，但对系统变动和参数变化不够鲁棒
模糊 PID 控制算法	一般	良好	适用于具有模糊性和非线性的系统，具有较好的鲁棒性
量子遗传 PID 控制算法	优秀	优秀	适用于复杂系统和参数不确定的系统，能够全局优化 PID 参数，提高了控制效果
自适应 PID 控制算法	良好	优秀	适用于动态变化的系统和参数随时间变化的系统，能够自动调整参数以适应系统变化，提高了控制鲁棒性

综合考虑，量子遗传 PID 控制算法因其在参数优化和系统适应性方面的优势，更符合光伏清洁机器人在复杂环境下精准行走的目标需求。它能够有效应对光伏电站中机器人可

能遇到的各种挑战，确保清洁作业的高效性和准确性，从而提升光伏发电系统的整体性能和可靠性。

1.3 研究内容与章节安排

本论文着重介绍了光伏机器人的软硬件设计以及应用层系统的构建。随后，针对机器人在运行过程中的位置检测问题和可能发生的位置偏移情况，进行了深入研究，并提出了解决方案。如图 1.7 所示，主要的研究工作和进展情况可归纳如下：

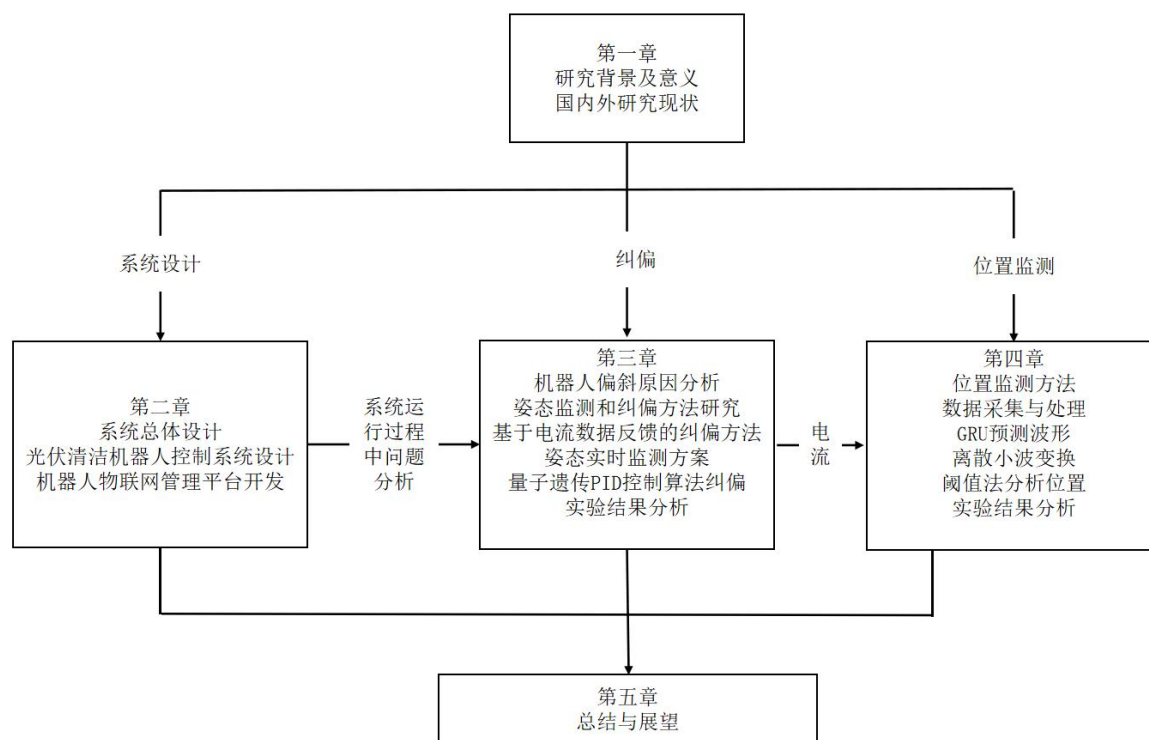


图 1.7 组织架构图

第一章：深入探讨了研究光伏清洁机器人的背景意义，并对机器人、运行监测技术以及机器人纠偏的研究现状进行了深入分析。

第二章：根据机器人的使用环境和技术需求，制定了整体方案。主要的硬件设计包括对机器人控制充放电、主控板、通信模块和电机控制模块的设计。软件设计涵盖了电机控制处理模块和通信模块。此外，针对机器人的后台管理系统，阐述了后端架构，包括用户端、设备端、监控运维端以及系统结构，同时还介绍了前端设计。

第三章：本章重点介绍了机器人在运行过程中可能发生的偏斜问题以及对其进行纠偏的方法。在对机器人姿态实时监测和校正方法的现有研究进行比较和分析之后，选定了一种基于电流数据反馈的光伏清洁机器人偏斜检测和纠偏方法。具体来说，在正常工作状态下，通过计算主电机与从电机的脉冲数来确定各自的转动圈数，并对比两者的圈数差异，以此来监测机器人的姿态。当机器人发生偏斜且圈数没有差异时，可以通过分析行走电机电流的变化趋势以及检查限位装置是否被激活来判断机器人的姿态变化。在此基础上，采

用结合量子遗传算法的 PID 控制算法对从电机的速度进行精细调整，从而有效纠正机器人的偏斜行为，确保其稳定运行。

第四章：本章着重介绍了机器人在光伏阵列中的位置检测方法。首先，描述了机器人运行的环境，即光伏阵列，并结合主电机电流的特性设计了整体方案。该方案首先采集并处理电流数据，然后利用 GRU 模型进行预测。随后，对预测得到的波形进行离散小波变换，以实现多尺度对电流特征的分析，并据此分析机器人所处的位置。

第五章：总结与展望。本章对机器人的整体设计和关键结果进行总结。并且分析设计的不足和对相关方案进行展望

第 2 章 光伏清洁机器人控制系统和物联网管理平台设计与实现

2.1 系统总体设计

2.1.1 使用环境及技术要求

悬挂光伏清洁机器人主要应用于如图 2.1 所示的地面集中式电站的荒漠地带，特别是那些缺乏 4G 网络覆盖的地区。在这些环境下，光伏电站往往面临着挑战，例如沙尘暴、风沙侵袭和日照强烈等，这些因素可能会导致光伏板表面积聚灰尘、沙尘或其他杂物，降低了光伏电池组件的发电效率。而传统的清洁方式往往不够高效，且需要大量的人力和物力投入，效率低下且成本高昂。在这种背景下，确保电站信息安全且实现系统的高效管理与监控是至关重要的。另外，电站信息不允许连接外网，因此需要本地部署管理服务，以保障数据的隐私和安全。考虑到电站规模较大，每个电站拥有大于 100 台机器人，因此系统必须具备高扩展性和强大的性能。为了有效管理机器人的运行和维护，需要在系统中实现机器人与多个跟踪架控制器的绑定，确保对机器人的准确控制和监测。



图 2.1 配备挂式光伏清洁机器人的集中式光伏电站

根据以上的使用环境，该系统的设计需要考虑以下几点要求：

（1）高容量、高可用性和高实时性的通信系统设计

系统应支持不少于 500 个通讯箱和 5000 台机器人的管理，且每个通讯箱至少支持 160 个机器人的接入。通信时间需要控制在小于 5 秒以内，以保证实时性和响应性。同时，为了应对可能出现的主机故障，系统必须具备冗余功能，主服务器和备用服务器切换时间应在 1 秒内完成，以确保系统的稳定性和连续性。

（2）系统的稳定性和可靠性设计

为了保证系统的稳定性和可靠性，硬件配置需要合理，能够在常规办公电脑上正常可靠运行。同时，为了降低系统部署和维护的复杂度，系统的安装应该是一键部署完成的，不应该需要复杂的安装流程。

(3) 系统安全性设计

在安全方面，系统必须具备高级的安全功能。配置文件和数据文件应支持备份、导入导出，并且数据文件应支持存储在其他介质上，以防止数据丢失。此外，系统不应对自身网络或连接的第三方系统产生干扰或攻击行为，确保系统的稳定性和安全性。

综上所述，本系统设计旨在解决地面集中式电站荒漠地带的光伏清扫需求。首先，针对荒漠地区等设有 4G 网络覆盖的环境，通信系统必须具备高容量、高可用性和高实时性，以支持大规模机器人的管理和监控。其次，为了保证系统的稳定性和可靠性，硬件配置需要合理，同时部署和维护流程应简洁高效。另外，系统的安全性也至关重要，需要具备高级的安全功能，确保数据的隐私和完整性。综合考虑以上因素，设计和实现光伏清洁机器人系统需要综合考虑通信、稳定性、可靠性和安全性等多方面因素，以满足电站清洁与管理的需求。

2.1.2 整体系统设计

该系统包含了光伏清洁机器人、LoRA 通信系统、本地 SCADA 系统、云平台、Android 调试 App 以及与第三方系统的对接功能。整体设计图，如图 2.2 所示。通过这一系统，可以实现对光伏板的智能清洁和监控，降低维护成本、提高清洁效率，并且通过云平台和 App，用户可以远程控制和监测清洁机器人的运行状态，实现更加便捷的管理。同时，系统的对接第三方系统功能，进一步拓展了其应用场景，使其具有更广泛的适用性和扩展性。

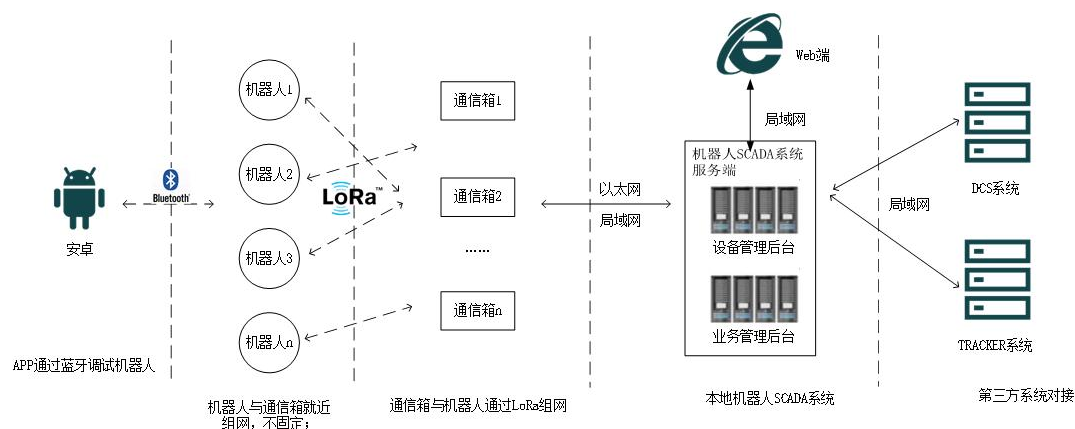


图 2.2 光伏清洁机器人整体设计图

光伏清洁机器人是专门设计用于清洁太阳能光伏板的智能设备，其主要作用是通过自动化的方式，定期清洁光伏板表面的尘土和杂物，确保光伏板的高效工作。通过使用各种模块，如数据采集、电机控制、电池保护、通信等，机器人能够实现自主运行、监测运行状态、处理异常情况，并能够与外部系统进行通信，从而实现远程更新和监控。其优势在于提高了光伏板的发电效率，延长了光伏板的使用寿命，同时减少了人工清洁的成本和风险。

LoRa 通信系统解决机器人与本地 SCADA 系统的无线数据传输。如图 2.3 所示，LoRa 网关通过交换机与后台 SCADA 系统通信，负责将机器人的实时数据传送到后台，同时接收后台 SCADA 的指令，对机器人相关参数设置以及实时控制。LoRa 网关通过 LoRa 通信技术实时采集机器人控制器的运行信息和故障信息，确保及时的监控和响应。同时，它还支持通过 Modbus 485 和模拟量采集天气传感器的数据。此外，LoRa 网关还配备 GPS 模块，用于时间校准和不同通信箱之间的冗余备份，以确保系统的稳定和可靠性。此外，LoRa 网关还拥有存储功能，能够保存 1 年的日志数据，并支持 OTA 升级，可以通过后台 SCADA 对通信箱程序进行远程升级。最后，LoRa 网关还配备以太网接口，能够与后台服务器进行局域网内的通信，为整个系统的运行提供了强大的支持和保障。

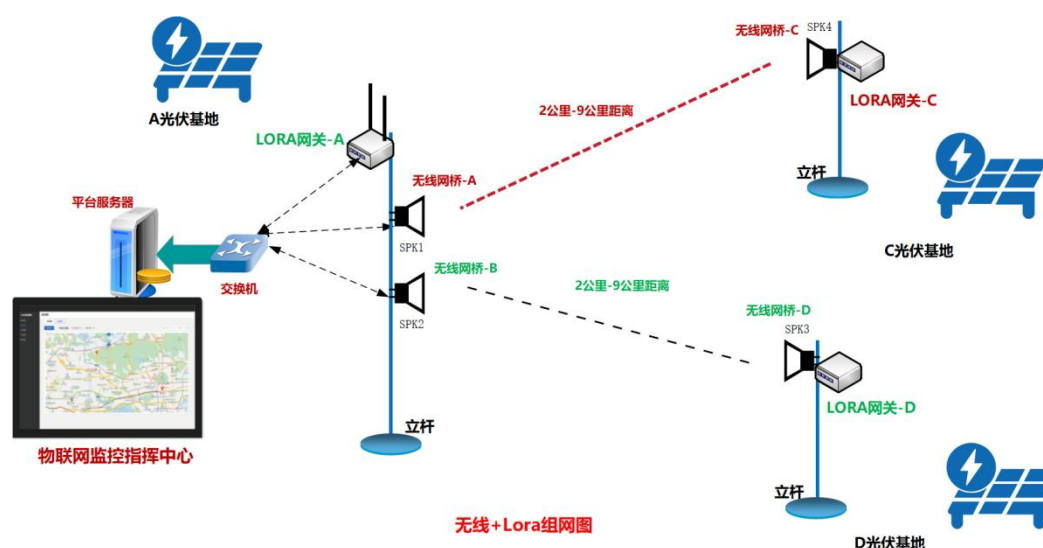


图 2.3 光伏清洁机器人无线通信系统设计图

主服务器和备用服务器分别承担系统的主要运算和冗余备份功能。主服务器负责处理系统的核心功能，包括接收和处理来自通信箱和其他设备的数据，执行各种算法和逻辑，生成报告和警报，以及为用户界面进行交互。备用服务器则作为主服务器的冗余备份，以确保系统在主服务器出现故障时能够无缝切换，并保持系统的连续性和稳定性。同时，服务器与第三方系统的对接则是为了实现系统与其他系统或平台的数据交换和集成，例如接收、处理和分析跟踪支架系统数据，获取支架的角度信息，从而判断光伏清洁机器人是否具备适当的条件来进行运行。这种对接能够提高系统的整体效率和价值，并为用户提供更加全面和便捷的服务体验。

安卓手机和光伏清洁机器人之间的连接方式可以通过蓝牙或串口。连接成功后，手机端可以实现对机器人的全面控制与管理。用户可以通过手机应用程序对机器人的参数进行调试和配置，确保其适应不同环境和任务要求。同时，手机应用还能够提供实时信息反馈，包括机器人的运行状态、电池电量、电机参数等，使用户能够及时了解机器人的工作情况。此外，用户可以通过手机应用对机器人进行远程控制，包括前进、后退、停机位设定等操作，以实现精确的控制和调度。另外，手机应用还能够记录和查看机器人的系统日志，包

2.2 光伏清洁机器人控制系统设计

MCU 主控模块位于机器人的智能核心，专门负责融合各项指令、加工处理数据以及指挥机器人的动作。这个模块基于嵌入式系统设计，能够实时接收来自传感器的数据，如光照强度、环境温度、电池电流等，并根据这些信息作出快速决策，控制机器人的驱动系统进行精准的移动和清扫操作。MCU 控制模块还负责管理电池电量，优化能耗，以及执行预设的清扫路线或响应远程控制命令。综合考虑，主控模块使用的 GD32F427ZGT6 芯

片，这是一款基于 ARM Cortex-M4 核心的微控制器，以其出色的性能和广泛的功能集，非常适合需要快速响应、高处理能力和多任务处理能力的光伏清洁机器人控制任务。

机器人主控板的部分结构框图如图 2.5 所示，这个模块主要包括机器人主控芯片、掉电检测、急停开关、电池温度检测、环境温度检测、限位开关、光线传感器、加热控制、散热控制、蓝牙模块、Lora 模块、存储模块、温湿度传感器、指示灯、蜂鸣器。

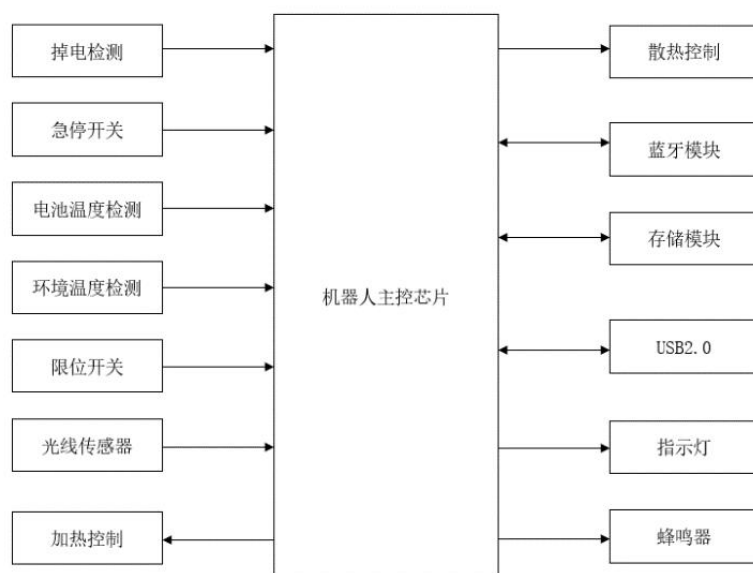


图 2.5 机器人主控板结构框图

掉电检测：机器人主控板检测到掉电引脚触发至少 50 毫秒时，触发掉电数据上报，即可立即启动应急程序。能够及时将掉电事件记录并上报相关数据，包括时间戳、电池信息以及设备状态等，确保用户能够迅速了解并应对掉电情况。

急停开关：是一种关键的安全装置，用于控制机器人的运行状态。当出现紧急情况或危险情况时，操作人员可以通过按下急停开关立即停止机器人的运行，从而防止事故发生或者减轻可能的损失。值得注意的是，急停开关的触发仅影响机器人的运行状态，而不会影响到主控板的正常工作，确保了机器人系统的安全性和稳定性。

电池温度检测：通过模拟数字转换器实时采集电池温度，并根据预设的保护参数进行监测和控制。当连续 5 次检测到电池温度超过设置的保护温度时，机器人会立即上报温度保护信号，同时行走电机和毛刷电机将减速停止，防风电机将机器人固定在原地，并通过故障指示灯闪烁提示操作人员。同时，充放电控制器也负责监测电池温度，并在温度不低于设置的恢复电压时解除电压保护。当机器人主控板检测到电池温度高于设定的高温阈值时，会自动启动风速散热系统，有效降低电池温度；而当温度低于设定的低温阈值时，会开启加热控制，以确保机器人在低温环境中正常运行。

环境温度检测：用于实时监测周围环境的温度变化。通过传感器定期采集环境温度数据，并将其传输至机器人主控板进行处理和分析。基于检测到的温度信息，机器人可以自动调整运行策略，例如在高温环境下增加散热措施以保持稳定运行，或在低温环境下启动

加热设备以防止冻结。这一温度检测功能有效提高了机器人在不同气候条件下的适应性和稳定性，保障了清洁任务的顺利完成。

限位开关：机器人配备了两个限位开关，用于检测机器人的位置状态，即到达近端停机位还是远端停机位。这些限位开关位于机器人轨道的两端，当机器人移动至轨道的极限位置时，限位开关将触发信号，通知机器人主控板当前位置状态。通过监测限位开关的状态，机器人可以精确确定自身位置，并相应地调整运动方向和停止动作，从而实现有效的运动控制和位置管理。

光线传感器：用于准确检测当前环境是白天还是黑夜。考虑到光伏发电的需求，机器人通常在夜间运行，以避免对光伏板发电的影响。当环境光线被光线传感器探测到较暗时，机器人将自动判断为夜晚，并切换至电池供电模式，以确保持续运行而不依赖于光伏板。反之，在白天，光伏板提供的电力足以支持机器人的运行，因此机器人将依靠光伏板供电。通过光线传感器的智能控制，光伏清洁机器人能够在不同的光照条件下自主调整能源来源，实现高效、稳定的运行，从而最大程度地利用光伏能源并保持机器人的可持续性。

加热和散热控制：根据电池温度检测模块检测到的温度，对电池温度进行调节。当检测到电池温度低于设定的阈值时，系统将自动启动电池仓的加热装置，以防止低温影响电池性能。这一加热装置直接消耗电池包的能源，通过主控板的 IO 接口进行控制。同时，系统还配备了风扇接口，其电压为 DC12V，最大供电电流为 2A，主控板通过 IO 控制风扇的通断。为了确保设备正常运行所需的散热能力，风扇的电压和电流数据将被实时采集监测，以保证系统在各种环境条件下的稳定运行。

蓝牙模块：主要用于与手机端 App 进行通信。通过蓝牙连接，用户可以发送控制命令、配置命令以及读取命令，实现对机器人的远程控制和监测。此外，蓝牙模块还支持通信制式、日志读取以及时间同步等功能，使得用户能够方便地查看机器人的运行状态、记录操作日志并进行时间同步。这一蓝牙通信系统极大地提升了用户与机器人之间的交互体验，使得操作更加便捷、灵活，并为机器人的智能化管理提供了有效的支持。

存储模块：是一种 Flash 存储模块，能够可靠地存储机器人系统每日的运行信息和日志数据。该存储模块具有足够的容量，能够保存机器人系统每日的运行记录，并保留这些数据至少 1 年的时间。这一功能不仅有助于机器人系统的运行监控和故障排查，也为后续的数据分析和性能优化提供了重要依据。通过存储模块的应用，光伏清洁机器人能够实现对自身运行情况的全面记录和管理，提升了系统的智能化程度和运行效率。

USB2.0：能够通过串口与手机连接，实现与手机 App 的交互。通过这种连接方式，用户可以轻松地使用手机 App 对机器人进行控制、升级和查看日志等操作。这种便捷的通信方式不仅提升了用户的操作体验，还为机器人的功能更新和故障排查提供了便利。通过 USB2.0 接口，光伏清洁机器人实现了与手机 App 的高效连接，为用户提供了更加智能化、便捷的操作方式。

指示灯：包括作业指示灯、充电指示灯和告警指示灯，用于显示机器人当前的工作状态和系统信息。这些指示灯可以呈现不同的状态，如常亮、常灭或闪烁，以反映机器人的实时运行状况。作业指示灯指示着机器人是否正在执行清洁任务，充电指示灯显示着机器人是否正在充电或电池状态，而告警指示灯则用于提示用户是否有故障或异常发生。通过这些指示灯，用户可以直观地了解光伏清洁机器人的工作状态，及时采取相应的措施，保证机器人的正常运行。

蜂鸣器：光伏清洁机器人配备了蜂鸣器，用于在特定情况下向用户提供提示和警告信息。当机器人检测到 USB 插入时，它会主动将存储模块内里的所有日志文件逐个拷贝到 USB 中。在拷贝期间，蜂鸣器将每隔 1 秒发出一次鸣叫，提醒用户正在进行文件拷贝操作。拷贝结束后，蜂鸣器将长时间鸣叫 10 秒，提示用户拷贝已完成。在此期间，如果出现故障，蜂鸣器将每隔 200 毫秒发出短促鸣叫，直到 U 盘拔出或故障解决。此外，如果用户向机器人发送指令或者出现故障情况，蜂鸣器也将发出相应的提示鸣叫，提醒用户注意。通过蜂鸣器的声音提示，用户可以及时了解机器人的状态和操作结果，确保机器人的正常运行和维护。

2.2.1 电机控制方案设计

如图 2.6 所示，光伏清洁机器人的电机控制模块负责管理行走电机、毛刷电机和防风电机的运行。行走电机分为主电机和从电机，主电机通常位于机器人的前部负责主要的行进动力，而从电机则通常位于机器人的后部辅助主电机实现平衡和稳定的行走。通过双电机的协调运作，光伏清洁机器人能够在不同地形和工作条件下保持稳定的行进。毛刷电机用于清洁光伏板表面，去除灰尘和杂物，确保光伏板的高效工作。防风电机则用于控制机器人在清洁过程中产生的风力，避免对光伏板造成损坏或影响清洁效果。

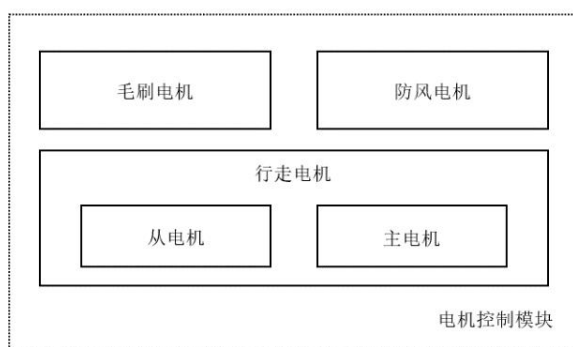


图 2.6 电机控制模块

行走电机可以选择有刷电机和无刷电机。经过测试发现，在机器人运行过程中，有刷电机往往会出现烧毁的情况，而无刷电机则具有更高的定性和可靠性。有刷电机是传统的直流电机，它们通过与电源接通的电刷来实现转子和定子之间的电气连接。这些电刷在运行过程中会因摩擦而产生磨损，导致电机寿命较短，并且可能在高速或高负载情况下产生火花，引发烧毁。相比之下，无刷电机采用电子换向技术^[27]，不需要使用传统的电刷，因此摩擦和磨损较少，寿命更长。无刷电机还具有高效率、低噪音和高转矩等优点，使其在

许多应用中成为首选^[28]。因此，选择无刷电机往往更适合用于长时间运行和高负载工作的机器人应用中。

电机控制处理模块主要负责控制电机状态、采集角度信息、执行定时运行、实现断点续扫和白天防误扫功能，并处理各种异常情况。电机状态控制模块：光伏清洁机器人在进行前进、后退或正常启动运行之前，首先机器人主控板会将电机参数下发到电机控制板。这些参数包括速率、上限电流停机值、上限电流预警值以及运行超时时间等。电机控制板接收到主控板的指令，它便可以通过脉冲宽度调制（PWM）控制对电机进行正反转控制和停止控制。其中，PWM 是一种调节模拟信号的技术，通过改变信号的脉冲宽度来控制电机或其他设备的电压、电流或功率^[29]。在电机达到预设速度之前，将进行软启动，逐渐加速至预设速度，以避免过快运转造成损坏。在停止运行时也同理，电机将逐渐减速至零。以机器人前进到停止为例，各种状态流程跳转如图 2.7 所示。

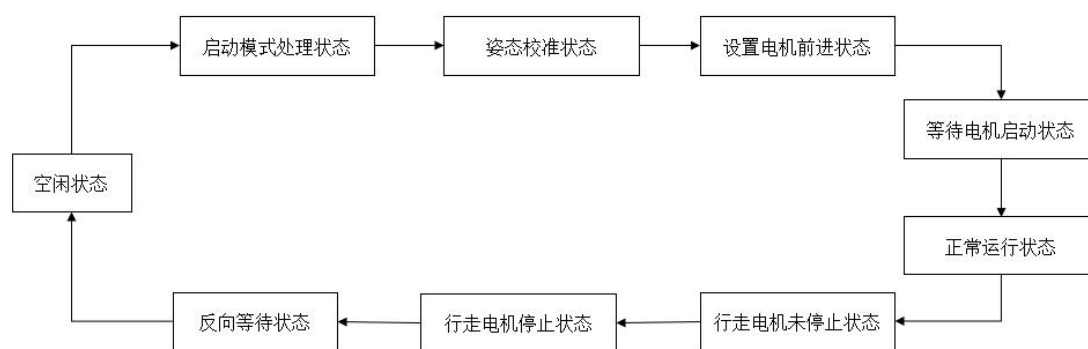


图 2.7 电机前进状态流转图

角度采集模块：模块以每 50 毫秒一次的频率采集数据，并以每 10 次取一次平均值的方式进行处理。电机控制板串口通信处理模块通过串口发送和接收队列实现 Modbus-RS485 串口通信的控制，并设定了默认的软件接收超时时间为 10 毫秒，以确保通信的及时性与可靠性。

定时运行：是指在云平台设定机器人的定时清扫时间，包括星期和具体的时分。一旦定时时间到达，云平台会根据机器人的编号查询第三方平台获取当前对应的跟踪支架信息以及跟踪支架网关信息。若未能查到或者不满足清扫要求，例如跟踪支架网关保护、跟踪支架保护、清扫路径上相邻的跟踪支架角度差超过云平台设置值、清扫路径上任意一个跟踪支架角度不在 -60 度至 60 度之间，则不会向机器人下发启动指令；反之，如果上述条件均满足，则云平台会向机器人下发运行指令。

断点续扫：当机器人在定时运行时发现低电量保护并退回停靠位后，待机器人充满电，机器人将回到上次清扫的位置，继续执行上次未完成的清扫任务。为实现断点续扫功能，机器人需要记录以下信息，如图 2.8 所示：清扫的位置、运行时间、运行方向以及运行次数。位置记录通过电机带霍尔传感器实现，记录电机单趟运行转动圈数，以判断是否到达上次低电量保护位置。运行时间记录包括单趟运行时间和低电量保护时的运行时间，用于

确定机器人是否返回到了上次低电量保护位置。返回前的运行方向是为了在返回停靠位时正确判断位置，因为停靠位可能是远端或近端，而机器人在低电量保护前的清扫方向不一定与返回方向一致。记录返回前运行次数可知道上次低电量保护前未完成的清扫次数，以便继续完成未完的清扫任务。这些信息的记录和保存将确保机器人能够在再次运行时恢复到上次未完成的清扫任务位置，实现断点续扫功能。

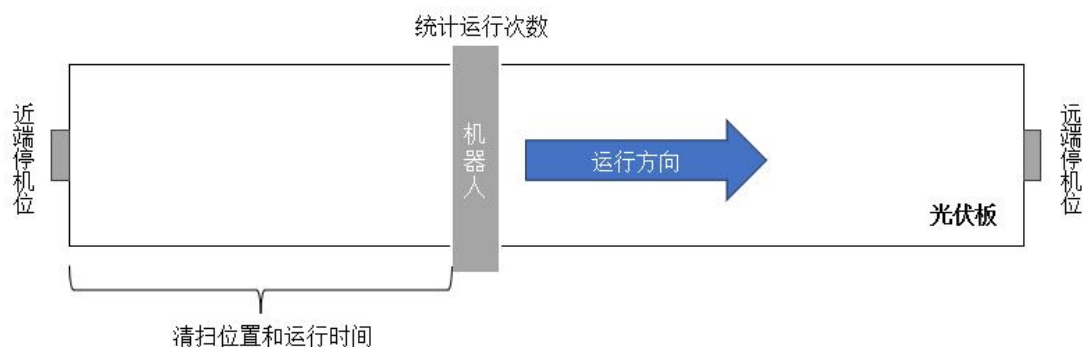


图 2.8 断点续扫记录数据模型

白天防误扫：机器人每隔 5 秒调用 RTC 时间接口，以获取当前时间，并与云平台设置的定时清扫时间进行比对。一旦定时时间到达，机器人会判断是否已开启白天防误扫功能。若已开启，则通过光线传感器采集出来的光照强度判断来输出白天防误扫状态。RTC 是实时时钟的简称，它是一种用于提供准确的实时时间的电子设备或模块。RTC 不受外界因素的影响，能够在没有外部电源的情况下持续运行，并保持准确的时间记录^[30]。

异常处理：包括电机上限电流预警、电机上限电流停机保护、运行超时保护、自动运行超时保护、大风保护、限位异常、角度保护以及角度偏差保护等。当机器人检测到任何异常情况时，如电流异常、通信故障、大风等，会立即采取相应的措施进行保护。这些措施包括减速停止、防风电机推出固定机器人，并会闪烁故障指示灯。这些保护措施能够有效应对各种异常情况，保障机器人的安全运行，同时将故障上报到云平台，及时告知操作人员并进行相应的处理。

2.2.2 电池管理方案设计

如图 2.9 和图 2.10 所示，电池管理模块包括光伏板、充放电控制器、空气开关断路器、锂电池组。

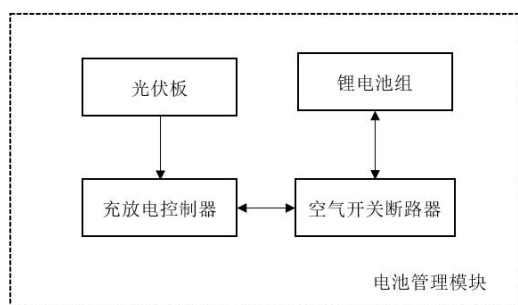


图 2.9 电池管理模块

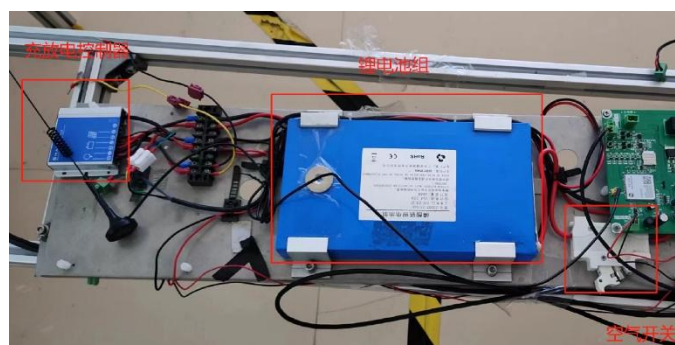


图 2.10 电池管理模块实物图

光伏板是通过光电效应的作用，能够把太阳光的能量转换为电能^[31]。当太阳照射到时，光能被光伏板中的光伏电池吸收并产生电压，从而产生直流电，为电池充电提供能量源。

充放电控制器的主要功能在于调节太阳能电池板输出电压的不稳定性，并有效地管理电能的储存和释放。首先，它负责监控和管理电池的充放电周期，确保电池不会发生过度充放电现象，从而延长电池的寿命并保证系统的安全运行。其次，充放电控制器还负责实时监测电池的电流、电压、温度和电量，并通过开关控制和调光控制来确保电能以最佳状态供给负载，同时有效地管理能量流动。总的来说，充放电控制器不仅仅是简单的调节装置，更是系统稳定性和性能优化的关键部件，它的精确控制和管理能力确保了系统的安全可靠运行，同时最大限度地提高了太阳能电池系统的效率和可靠性。

充放电控制器通过 Modbus-RS485 串口通信，实现对太阳能系统关键参数的监测和控制，包括读取电池电压、电流、状态和电量，以及控制器的温度等信息。同时，它能够实时获取充电和放电状态下的电压、电流等数据，通过这些信息来调节系统的充放电过程，确保系统的稳定运行。Modbus-RS485 是一种常用的串行通信协议，用于在工业控制系统中传输数据，具有较高的稳定性和可靠性。

空气开关断路器是一种电气设备，其功能在于保护电路免受过载、短路等故障的影响，并在必要时切断电流，以防止电路或设备受损。在光伏板和电池之间设置空气开关断路器有助于确保电路的安全性。当电流异常时，断路器能够快速切断电路，从而保护电池系统和相关设备的安全。

锂电池组中常使用是磷酸铁锂电池组，它具有长寿命、较低的自放电率和良好的安全性能等优点^[32]。它接收并存储光伏板通过充放电控制器输送的电能，其作用是在光伏板供电时存储电能，并在夜间或光照不足时释放储存的电能，为电力需求提供持续的供应。

2.2.3 机器人通信方案设计

机器人支持两种通信方式：LoRa 通信用于与通信箱进行通信，而蓝牙通信用于与手机端的 app 进行通信。这两种通信方式均可用于发送控制命令、配置命令、时间同步、日志读取以及进行设备升级等操作。

指令的制定规则确保了通信的准确性和可靠性。如图 2.11 所示，帧类型分为数据帧、命令帧、应答帧、告警帧。数据帧是在传输大数据文件时，将文件切分成多个数据帧进行发送的一种通信方式。命令帧则是由云平台、通信箱或者 APP 发起的命令，而机器人则通过发送应答命令帧来响应这些命令。应答帧可以分为两种：无数据的应答帧和有数据的应答帧。无数据的应答帧中，数据域为空，而帧计数器值则对应所要求的应答的帧计数数值。而有数据的应答帧则包含着对应下行命令帧的回复数据，并且帧计数器值也对应所要求的应答的帧计数数值。在发生告警事件时发送告警状态数据以及相应的命令标识和参数，采用告警帧通信。

数据帧：

帧头					数据域	帧尾	
帧起始符	控制码	机器人编号	帧计数器	数据域长度	数据	校验码	结束符

命令帧、有数据应答帧、告警帧：

帧头					数据域		帧尾	
帧起始符	控制码	机器人编号	帧计数器	数据域长度	命令标识	命令参数	校验码	结束符

无数据应答帧：

帧头					数据域	帧尾	
帧起始符	控制码	机器人编号	帧计数器	数据域长度	空	校验码	结束符

图 2.11 帧类型示意图

数据上报在机器人系统中分为两类：主动上报的数据和被动上报的数据。被动上报的数据是指通过 LoRa 或蓝牙下发的指令回复所产生的数据。在这两类上报中，采用了不同的上报规则，分别是 ACK 类和非 ACK 类。对于主动上报的数据，其中包括了一些关键的参数信息，如电机状态、电池状态等，由于对数据实时性要求较高，而对数据可靠性要求相对较低，这些参数的上报采用了非 ACK 类。非 ACK 类的上报机制意味着发送方可以连续地传输数据，而不必等待接收方发出确认信号。而对于其他类型的数据，包括了运行数据、故障数据以及掉电数据等，以及被动上报的数据，由于对数据的可靠性要求较高，采用了 ACK 类的上报规则。ACK 类的上报机制需要接收方返回确认信号，以确保数据的可靠传输。在这种机制下，发送方会等待一定时间以接收来自接收方的确认信号，如果在规定时间内未收到确认信号，会进行重发 3 次，直到接收到确认信号为止。

在 LoRa 通信系统中，如图 2.12 所示，通信箱可以根据需要分配到不同的频段进行通信，而每个频段内的通信箱都可以与机器人进行组网，实现设备之间的互联互通。通过接收通信箱发送的数据，机器人可以将其传输到服务器，实现数据的收集、分析和处理。在 LoRa 通信协议的实现上，需要根据 LoRaWAN 协议规范进行开发，确保与通信箱之间的数据交换符合标准。LoRaWAN 采用了 ALOHA 算法作为其防冲突的机制。ALOHA 协议的原理是只要节点有数据要发送，就允许它们发送。在规定的窗口内，如果收到了应答，就表示发送成功；否则，节点将会按照设定的重发策略进行重新发送^[33]。

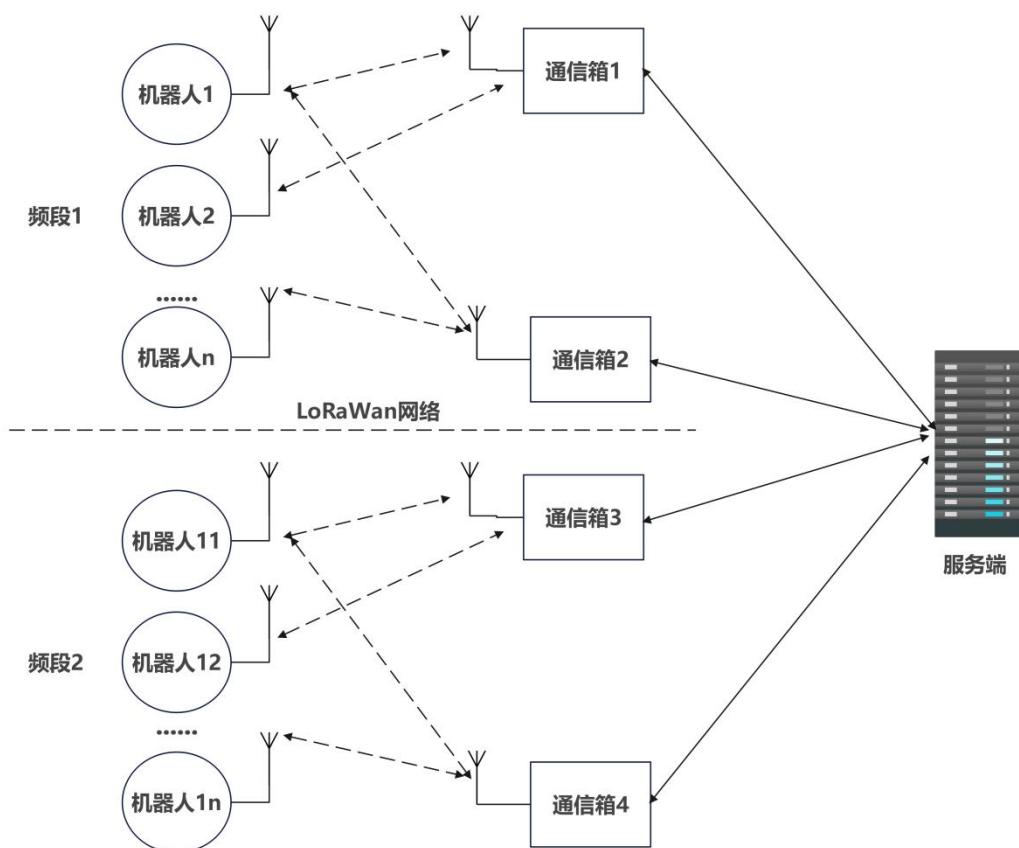


图 2.12 LoRa 网络架构

蓝牙通信软件设计是确保与手机端 App 之间进行可靠通信的关键。该软件设计包括蓝牙通信协议的实现、数据传输的编解码、通信状态的管理以及异常处理等方面。在蓝牙通信协议的实现上，需要根据 Bluetooth Low Energy(BLE)协议规范进行开发，确保与手机端的通信符合标准^[34]。

2.3 机器人物联网管理平台开发

研究过程中通过经过充分的技术评估和实践经验的积累，如图 2.13 所示，最终决定采用 Spring Cloud 作为微服务框架，搭配 Nacos 作为服务发现和配置中心，MySQL^[35]作为关系型数据库系统，RabbitMQ 作为消息中间件来组成用户端系统。采用 ChirpStack^[36]作为用户端与设备端的通信平台，以及 Nginx^[37]作为反向代理服务器来部署系统。

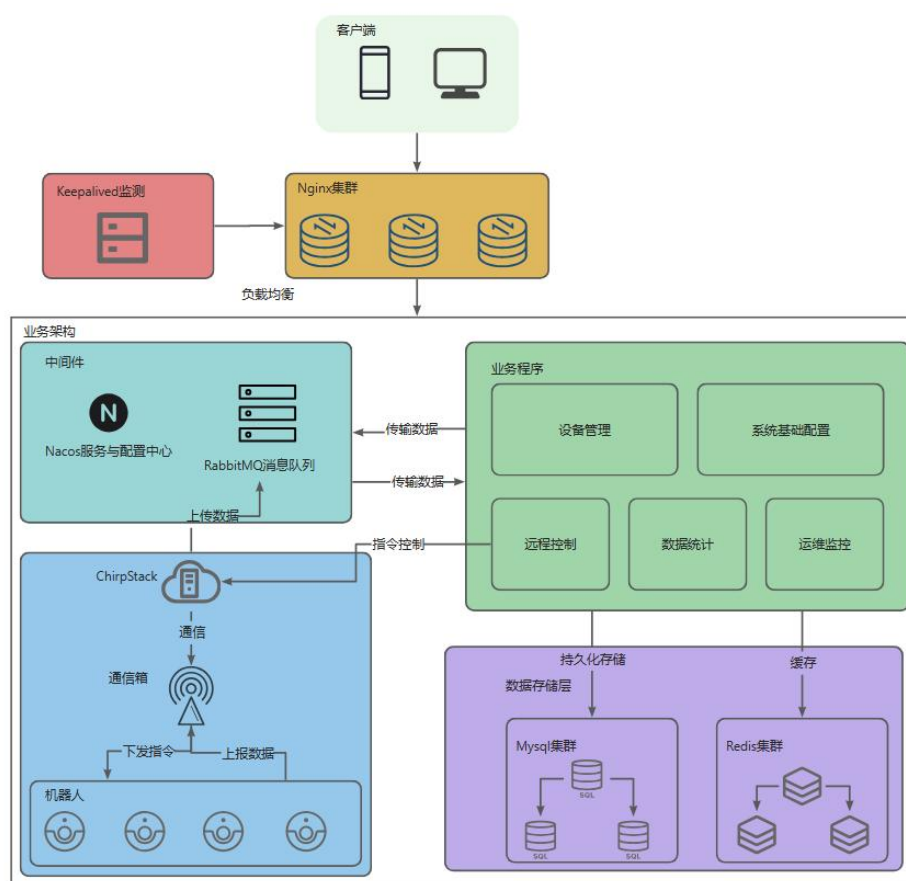


图 2.13 管理平台架构图

首先，选择了 Spring Cloud 作为微服务框架。它提供了全面的微服务支持，包括分布式跟踪、微服务调用、负载均衡、断路器模式等功能。这些特性使构建和管理分布式系统更容易，Spring Cloud 同时的强大生态系统提供了各种解决方案，能够满足不同场景下的需求，使得微服务的开发和部署更加高效和灵活。

其次，作为微服务架构的基石之一，选择了 Nacos 作为服务注册与发现以及配置中心。Nacos 是一个开源平台，专注于服务发现和配置管理，具有强大的动态配置、服务发现和流量管理能力。通过整合 Nacos，能够实现微服务的自动注册和发现，确保服务之间能够实现动态的通信，提高系统的灵活性和可扩展性。同时，Nacos 的配置中心功能可以集中管理微服务的配置信息，实现配置的集中化管理，便于系统的统一配置和修改，使用 Nacos 的动态配置管理，可以在运行时动态修改某个微服务的配置，而不需要重启服务。这对于调优系统性能或者应对实时变化的业务需求非常有帮助。

关于数据存储，选择了 MySQL 作为关系型数据库系统。MySQL 以其成熟的技术、广泛的应用和高性能而著称。作为关系型数据库，MySQL 提供了强大的事务支持、数据一致性和稳定性。可以通过合理的数据库设计和优化查询语句，满足系统对于数据一致性和可靠性的需求。MySQL 的开源性质和社区支持也提供了更多的灵活性和可扩展性。

作为消息中间件的选择，采用了 RabbitMQ。RabbitMQ 是一个高性能的、可靠的消息队列系统，支持多种消息模式，包括点对点和发布/订阅。它还具备消息持久化、消息路由

等特性，确保消息在传递过程中的可靠性。在微服务架构中，不同的服务之间经常需要进行异步通信，而消息中间件能够很好地解耦消息的发送方和接收方，实现松耦合的系统设计。RabbitMQ 通过其可靠的消息传递机制、支持的协议和持久化等特性，使消息通信基础更可靠。

2.3.1 WEB 管理端设计

Web 前端设计是指通过 HTML、CSS 和 JavaScript 等技术，将用户界面设计与后端逻辑相结合，为用户提供直观友好的网页交互体验。在光伏清洁机器人项目中，采用 VUE^[38] 作为前端框架，能够快速构建响应式的单页面应用，利用其强大的组件化开发特性，如图 2.14 所示，实现设备地图、设备管理、告警界面、数据统计分析、运维管理以及系统基础配置 6 个模块的前端界面。



图 2.14 web 端模块

设备地图页面通过模拟现实场景，展示了一个光伏清洁机器人项目中的设定区域。在这个页面中，每个跟踪支架都用对应的模型显示，并且通过不同的小图标展示了跟踪支架的状态。这些状态图标可以是不同颜色或者形状的符号，用来表示支架的工作状态、清洁情况等信息。同时，机器人在跟踪支架上，根据嵌入式上报的机器人电流数据，实时分析当前机器人所处的位置。这意味着在地图上，可以看到机器人的动态移动，以及根据其所在位置的不同，可能会有对应的状态变化。用户可以通过点击支架或者机器人，触发右下角显示设备信息的功能。这些设备信息可能包括支架的编号、位置信息，以及机器人的状态、工作情况等。总的来说，这个设备地图页面通过模拟现实场景，以直观的方式展示了光伏清洁机器人项目中设备的分布情况、工作状态以及相关信息，为用户提供了方便快捷的设备监控和管理功能。

设备管理页面是光伏清洁机器人项目的核心部分之一，它负责管理机器人的分区、录入机器人信息，并且可以向机器人下发设备参数和控制指令。此外，还可以设置每个机器人的清扫路径，以确保清洁任务的高效执行。

在设备管理页面中，管理员可以对机器人进行分区管理，将其分配到不同的工作区域，并且录入机器人的基本信息，包括型号、序列号等。管理员可以通过界面上的操作，向机器人发送设备参数配置、控制指令等，实现对机器人的远程监控和控制。除此之外，设备管理页面还负责管理和平台通信的网关，并记录相应的通信日志。这些日志记录可以包括

通信状态、数据传输情况等，用于后续的监控和分析。综上所述，设备管理页面承担了对机器人的管理和控制功能，通过界面直观地展示了机器人的分区情况、设备信息，并提供了操作接口，实现了对机器人的参数配置、控制指令下发以及通信日志记录等功能。

告警页面用于展示光伏清洁机器人项目中的历史告警和实时告警信息，包括机器人和网关等设备的告警情况。在这个页面上，用户可以查看历史上发生过的告警事件，以及当前正在发生的实时告警。告警信息可能包括设备故障、通信中断、异常数据等。通过直观的界面展示，用户可以快速了解到各个设备的告警状态，并及时采取相应的措施进行处理和解决。告警页面的设计旨在帮助用户及时发现和处理设备的异常情况，确保光伏清洁机器人项目的稳定运行和高效工作。

数据统计分析页面用于展示光伏清洁机器人项目中机器人的实时和历史运行数据，并记录操作记录，包括机器人下发指令的记录以及平台的登录情况。在该页面上，用户可以查看机器人的实时运行数据，包括清扫时间、清扫范围、清扫效率等指标。同时，还可以查看历史运行数据，包括过去一段时间内的清扫记录、工作时长、清扫效果等数据，帮助用户了解机器人的工作情况和性能表现。此外，数据统计分析页面还记录了操作记录，包括了用户对机器人的操作，如下发指令、配置参数等，以及平台的登录情况，帮助用户跟踪管理平台的使用情况和操作历史。数据统计分析页面提供了机器人的实时和历史运行数据的展示，并记录了操作记录 and 平台登录情况，为用户提供了全面的数据分析和操作历史记录，帮助用户更好地了解和管理光伏清洁机器人项目。

运维管理页面用于显示光伏清洁机器人项目中设备的状态信息，包括机器人和网关等。在该页面上，用户可以查看设备的实时状态，包括机器人的工作状态、连接状态以及网关的运行情况等。这些状态信息可以帮助用户及时发现设备的异常情况，并采取相应的措施进行处理和维修。除了设备状态信息，运维管理页面还显示了清扫记录和运行可靠性分析数据。清扫记录包括了机器人的清扫路径、清扫时间等信息，帮助用户了解机器人的工作情况和清扫效果。而运行可靠性分析数据则用于评估设备的运行稳定性和可靠性，帮助用户进行设备维护和性能优化。运维管理页面提供了设备状态的实时监控和运行数据的分析，帮助用户进行设备运维管理和性能评估，确保光伏清洁机器人项目的顺利运行。

系统基础配置页面用于管理光伏清洁机器人项目中的登录账号，包括账号的角色和权限设置。在该页面上，管理员可以进行账号管理，包括添加新账号、删除账号、修改账号信息等操作。同时，管理员还可以设置每个账号的角色和权限，确定其在系统中的操作范围和权限级别。这些权限可能涉及到对设备的管理、数据的访问、系统的配置等方面。通过系统基础配置页面，管理员可以灵活地管理用户账号，确保每个用户都能够在系统中拥有适当的权限和角色，保障系统的安全性和管理的有效性。系统基础配置页面提供了对登录账号、角色和权限的管理功能，帮助管理员灵活设置和管理用户的权限，确保光伏清洁机器人项目的安全运行和有效管理。

2.3.2 APP 应用程序设计

为了现场调试，使用 UniApp^[39]进行开发了这一款 App。该 APP 可以与机器人通信，从而控制和查看机器人信息，如图 2.15 所示，主要包括控制、实时信息、系统日志和我的四个模块。

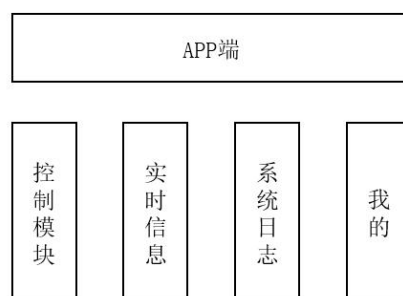


图 2.15 APP 端模块

控制模块是负责选择与机器人通信的方式，并建立连接以获取设备编号，从而实现对机器人的运行状态进行控制的功能。用户可以通过该模块选择蓝牙或串口等通信方式，与机器人建立连接，并获取机器人的唯一编号。通过这个编号，用户可以进一步控制机器人的运行状态，例如前进、后退等操作。

实时信息页面主要用于实时查看机器人的状态、通信质量以及电池电流等关键数据。在该页面上，用户可以即时获取机器人的当前状态，包括工作状态、连接状态等。同时，用户还可以查看机器人与控制端的通信质量，确保通信稳定性。另外，用户可以实时监测机器人的电池电流情况，以便及时了解电量消耗和电池状态。总的来说，实时信息页面为用户提供了实时监控机器人运行状态和关键数据的功能，帮助用户及时了解机器人的工作情况，保障设备的正常运行。

系统日志页面允许用户查看机器人的各种事件记录，包括预警、告警、运行以及上下线等日志。在该页面上，用户可以浏览机器人产生的各类预警和告警日志，这有助于迅速察觉设备的任何异常状态，并据此采取必要的应对措施。此外，用户还可以查看机器人的运行日志，了解设备的工作情况和历史记录，以便进行性能分析和优化。另外，系统日志还记录了机器人的上下线状态，使用户能够追踪设备的在线情况。综上所述，系统日志页面提供了对机器人各种事件的记录和查看功能，帮助用户了解设备的运行状态和历史记录，为设备维护和管理提供了便利。

我的页面主要用于管理用户个人信息以及下发机器人的相关参数和升级操作。在该页面上，用户可以进行个人信息的管理，包括账号设置、密码修改等。此外，用户还可以通过该页面下发机器人的相关参数，例如设置清扫路径、调整清扫模式等。另外，用户还可以在该页面进行机器人的软件升级操作，以获取最新的功能和性能改进。总的来说，我的页面为用户提供了个人信息管理以及机器人参数设置和升级的便捷功能，使用户能够灵活地配置和管理自己的设备。

2.4 系统展示图

2.4.1 设备端展示

图 2.16 展示了光伏清洁机器人的电路板设计；图 2.17 则呈现了光伏清洁机器人电路板的批量生产情况；图 2.18 可见机器人内部结构的示意图；图 2.19 是模拟现场环境调试运行图；图 2.20 展示了机器人在实际运行时的情况。



图 2.16 光伏清洁机器人电路板



图 2.17 部分光伏清洁机器人电路板量产图



图 2.18 机器人内部结构图



图 2.19 机器人测试现场图



图 2.20 机器人实际运行图

2.4.2 Web 端展示

图 2.21 是机器人的区域管理界面，展示了各个区域的布局与管理情况；图 2.22 是每个分区下的机器人列表；图 2.23 是用于下发参数给机器人的界面；图 2.24 是通过动画展示了分区内机器人的运行情况和位置；图 2.25 是与机器人通信的网关参数配置界面；图 2.26 是对机器人的信息进行了汇总展示，使用户能够全面了解机器人的状态和运行情况。



图 2.21 机器人分区页面

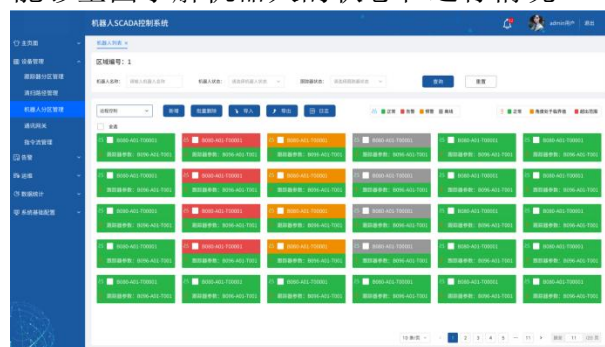


图 2.22 机器人列表页



图 2.23 机器人参数配置

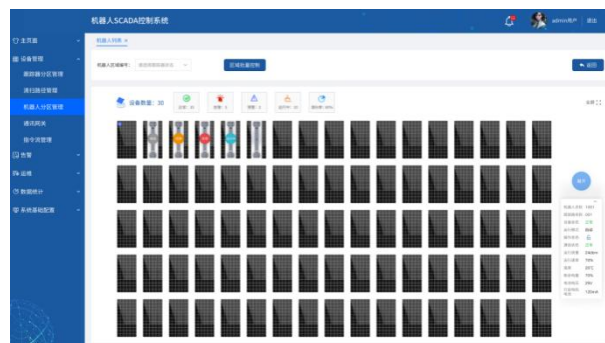


图 2.24 设备地图

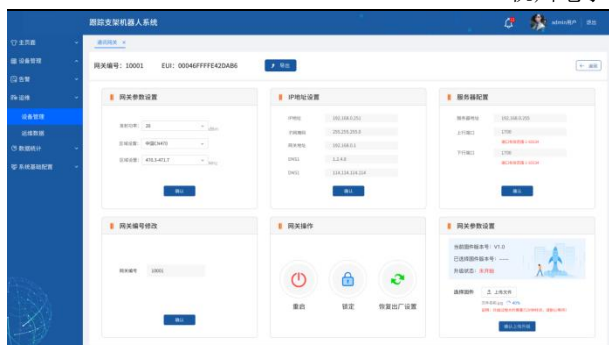


图 2.25 网关参数配置



图 2.26 系统大屏

2.4.3 APP 应用程序展示

图 2.27 展示了机器人的控制界面，用户可以通过该界面对机器人进行各项操作和控制；在图 2.28 中，用户可以实时查看机器人的各项信息，包括状态、运行模式等；图 2.29 展示了查看机器人日志的界面，方便用户追踪机器人的活动历史和运行情况；图 2.30 提供了机器人参数配置和升级的界面，用户可以根据需求对机器人进行参数调整和软件升级。



图 2.27 App 首页



图 2.28 实时信息



图 2.29 系统日志



图 2.30 其它

2.5 本章小结

本章详细介绍了光伏清洁机器人系统的设计与实现。首先，对系统进行了全面的需求分析和总体设计，然后深入研究了系统各个组成部分的详细设计，包括机器人的主控板、电机控制、电池管理以及机器人的通信方案。随后，介绍了物联网管理平台的 WEB 端和 APP 应用程序，并简要展示了它们的功能和特点。最后，展示了实物和平台操作界面。

第 3 章 基于电流数据反馈的光伏清洁机器人偏斜检测和纠偏方法

清洁机器人在光伏电站组件上清洗行走时，因上下两对滚轮摩擦力不同、行驶的光伏组件表面情况不同、电机驱动可能存在微小差异等原因，机器人必定会出现上下端运行速度不一的情况，该情况可能会导致机器人倾斜角度过大甚至卡死，严重时还会导致机器人的电机甚至支架损坏。在机器人运行过程中，需要对机器人运行姿态实时检测、并对异常姿态进行及时调整。本文提出了一种基于电流数据反馈的光伏清洁机器人偏斜检测和纠偏方法。通过对主从电机电流数据的实时检测、分析，获取机器人当前姿态，通过量子遗传 PID 算法对机器人进行纠偏，在机器人在行走过程中，通过多次反馈修正使机器人姿态回正，平稳行进。由于电机运行时的电流数据一致好，抗干扰能力强，通过电流数据引起机器人姿态误判的概率小，方案具备现场可行性。

3.1 清洁机器人偏斜原因分析

光伏清洁机器人因上下两对滚轮摩擦力不同、电机驱动可能存在微小差异等原因，机器人必定会出现上下端运行速度不一的情况，机器人就会发生倾斜，随着行走时间的增加，倾斜角度越来越大，可能会导致机器人倾斜角度过大甚至卡死，严重时还会导致机器人的电机甚至支架损坏，如图 3.1 所示。

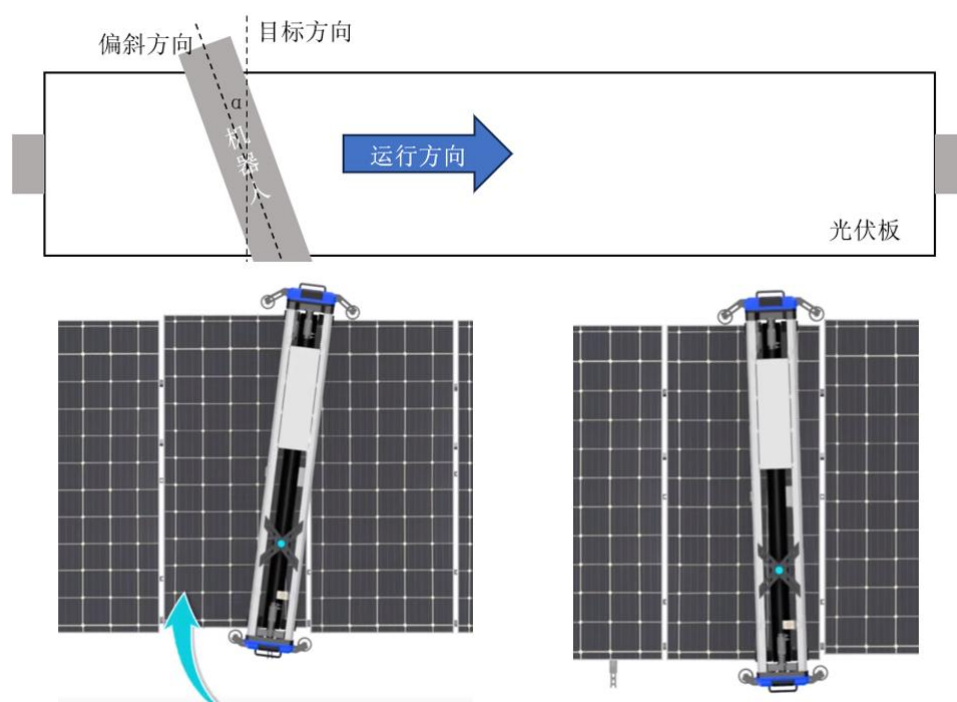


图 3.1 机器人偏斜示意图

光伏清洁机器人在运行过程中可能会引起偏斜的原因有多种，以下是一些常见的因素：

表 3.1 引起清洁机器人偏斜的 10 大原因

序号	引起偏斜的原因	描述
1	地面不平	光伏板安装在不平坦的地面上，导致机器人行走时发生偏斜。
2	轮子磨损	行走轮因长时间使用或在粗糙表面上行走而磨损不均。
3	驱动系统差异	两个并行驱动系统存在速度差异或力矩不一致。
4	外部干扰	风力、杂物等外部因素影响机器人稳定性。
5	设计缺陷	机器人的结构设计或制造缺陷影响稳定性
6	控制算法不当	控制系统未能准确响应或处理传感器数据，导致纠偏指令不准确。
7	电池电量不足	电量不足导致动力减弱，可能引起行走轮转速不一致。
8	环境变化	温度、湿度等环境因素变化影响机器人材料的物理特性。
9	负载不均	光伏板表面污垢分布不均，清扫过程中负载不均可能导致偏斜。
10	软件故障	软件系统故障或编程错误导致错误的运动控制指令。

3.2 清洁机器人运行姿态实时检测及纠偏方法

目前，相关企业和院校对清洁机器人运行姿态实时检测及纠偏方法已经进行深入的研究和探索，本文对相关专利进行总结，如下表所示：

表 3.2 机器人姿态检测及纠偏方法专利汇总表

序号	专利名称	专利号	专利权人	公开时间	纠偏技术特点	姿态检测方法	纠偏执行方式
1	一种光伏机器人的路径纠偏系统及光伏机器人 ^[40]	CN117401032A	厦门蓝旭科技有限公司	2024.01.16	实时监测机架移动位移并快速纠正	数据采集模块、转向机构	控制模块生成控制指令进行旋转纠正
2	一种光伏清扫机器人防卡死纠偏机构及光伏清扫机器人 ^[41]	CN116586394A	江苏德天智能科技有限公司	2023.08.15	通过随动臂、侧轮、摆动检测元件和弹性复位件纠偏	随动臂、侧轮、摆动检测元件、弹性复位件	检测随动臂偏摆方向和位置，及时纠偏
3	光伏清洁机器人的偏移纠正方法、装置、计算机设备及可读存储介质 ^[42]	CN115755883A	杭州舜海光伏科技有限公司	2023.03.07	根据从电机端相对位置信息动态调整运行速度	位置确定模块、偏移判断模块	控制从电机端调整运行速度
4	一种防偏移光伏板清洁机器人 ^[43]	CN117382760A	安徽振达刷业有限公司	2024.01.12	使用定位吸盘和控压机构防止转向时打滑	定位吸盘、动力机构、控压机构	操纵定位吸盘升降和改变气压
5	光伏清洗机器人的自动纠偏方法、纠偏系统及清洗机器人 ^[44]	CN115268442A	湖州丽天智能科技有限公司	2022.11.01	通过获取加速度值和角速度值计算方位角，与预设方位角比较生成纠偏指令	加速度计、陀螺仪、存储器、执行机构	基于优化预测倾斜角度和磁场强度确定方位角，生成纠偏指令控制行走轮运行
6	光伏悬挂式清扫机器人位姿调整方法、装置和电子设备 ^[45]	CN117415811A	天合光能股份有限公司	2024.01.19	通过光流传感器实时坐标计算运行状态	光流传感器	调整驱动电机运行速度

续表 3.2

序号	专利名称	专利号	专利权人	公开时间	纠偏技术特点	姿态检测方法	纠偏执行方式
7	一种用于光伏清扫机器人的偏差检测装置 ^[46]	CN117168280A	新疆维吾尔自治区计量测试研究院	2023.12.05	机械方式放大倾斜角度，使用编码器	主梁、行走机构铰链套、偏差检测机构	根据放大的倾斜角度进行纠正
8	光伏电站行走清洗机器人行驶偏离判定装置及修正方法 ^[47]	CN110398973A	王成	2019.11.01	通过边缘检测传感器识别组件边框边缘	边缘检测传感器	微调单侧行走驱动轮的速度
9	光伏板清扫机器人及其偏斜检测和纠偏方法 ^[48]	CN109382384B	阳光电源股份有限公司	2020.05.22	利用万向轮主轴的检测装置检测偏斜	万向轮主轴检测装置	调节电机转速实现自动纠偏
10	一种光伏清洁机器人的双轴姿态矫正装置及态矫判断方法 ^[49]	CN116048134A	安徽工业大学	2023.05.02	双轴姿态矫正，使用超声波探测器和水平倾角传感器	超声波探测器、水平倾角传感器	控制驱动机构减速增扭
11	光伏组件清扫机器人纠偏系统 ^[50]	CN217411829U	合肥仁洁智能科技有限公司	2022.09.13	通过感应传感器和决策机构进行纠偏	感应传感器	调整驱动轮的运动参数

通过对以上专利的分析，目前对清洁机器人的运行姿态实时检测方法有以下 3 种：

（1）九轴传感器

九轴传感器集成了三个主要传感器，分别是三轴陀螺仪、三轴加速度计和三轴磁力计^[51]。这种设计使得传感器能够在三个轴向上分别测量物体的角速度、磁场强度和加速度，为机器人提供了全面的姿态信息。在机器人安装时，先进行一次自校准，以获取地磁感应功能所需的垂直航向角数据，机器人在运行过程中，根据安装时获取到的数据实时调整角度。

然而，考虑到本系统运行的应用场景是跟踪支架能够控制光伏阵列的角度，以优化光伏板对阳光的收集效率，因此很可能存在两个相邻光伏阵列之间角度不同的情况。这种情况下，机器人在运行过程中，由于机器人会保留初始光伏阵列的数据，导致在下一个光伏阵列运行时存在偏斜问题。此外，九轴传感器容易受到温度、震动、磁干扰和金属等外部影响，尤其在机器人外壳为铁质的情况下更加明显。若将传感器安装在外部，机器人运行环境的恶劣性会损耗传感器。

（2）基于电阻环的主轴旋转位移检测

该方法是在光伏机器人的底盘上安装了万向轮，并设计主轴为两部分。一部分与万向轮的轴承相连，固定不动；另一部分则与机器人的底座紧密结合；这两部分通过一个轴承实现连接。当机器人发生偏斜时，这两段之间会产生旋转位移。通过电阻环的阻值大小可

以判断旋转位移的大小和方向。根据阻值的变化，系统可以相应地调节电机的转速，从而实现机器人的纠偏功能。

这种方法的优点在于其成本低廉，这主要归因于采用了简单而经济的电阻环检测旋转位移的设计。即使在机器人上电启动前处于倾斜状态，仍然能够通过系统自动纠正，这提高了机器人的稳定性和可靠性。然而，值得注意的是，这种方法的缺点也是显而易见的。首先，在机器人安装时需要进行角度设置，这增加了部署和调试的复杂性。此外，当机器人需要上桥架时，角度传感器可能会受到磁钢范围的影响而导致调速异常，从而造成偏斜。

（3）红外测距调速

红外测距^[52]是指通过红外测距传感器来检测电机左右两侧与光伏板之间的距离。当检测到的距离超出了预设范围时，系统会根据实际情况调节电机的速率，以实现机器人的自动纠偏功能。这一技术的应用使得机器人能够在工作过程中及时感知到与光伏板之间的距离变化，从而可以迅速作出相应的调整。

这种方法的优点在于其能够在机器人上电启动前，即使机器人处于倾斜状态，仍能够迅速回正，同时实现了对距离的高精度测量，能够准确地探测到电机左右两侧与光伏板之间的距离变化。然而，与此同时，该技术也存在一些挑战和局限性。首先，红外测距传感器对环境中的光线、温度和湿度等因素较为敏感，可能会受到干扰，特别是在有强烈光线或极端温度条件下，其测量精度和可靠性可能会受到影响。其次，测量范围有限，通常需要保证传感器始终可以距离光伏板侧边 2~7cm。而且当光伏板侧边存在凹凸不平或传感器表面积聚灰尘时，测量数据容易出现误差，这可能会影响机器人的自动纠偏功能的准确性和稳定性。

考虑到本文中设计的机器人将在沙漠地区运行，这种恶劣环境下的操作条件对设备的稳定性提出了严格要求。同时，由于应用的光伏阵列需要依赖跟踪支架调节角度，因此必须考虑桥架的影响。然而，表 3.3 根据受桥架影响程度和受环境影响程度进行比较，上述三种方案均不适合本系统的需求。

表 3.3 机器人纠偏方式对比

纠偏方式	受桥架的影响	环境影响
九轴传感器	严重	严重
基于电阻环的主轴旋转位移检测	一般	轻微
红外测距调速	轻微	严重

为了满足系统的需求，本文提出了一种基于电流数据反馈的光伏清洁机器人偏斜检测和纠偏方法。通过对主从电机电流数据的实时检测、分析，获取机器人当前姿态，通过量子遗传 PID 算法对机器人进行纠偏，在机器人在行走过程中，通过多次反馈修正使机器人姿态回正，平稳行进。

由于电机运行时的电流数据一致好，抗干扰能力强，通过电流数据引起机器人姿态误判的概率小，方案具备现场可行性。此外，即使在光伏板桥架连接不平行的情况下，该方法仍然能够有效地进行调速，保证了机器人在复杂环境下的稳定运行。

3.3 基于电流数据反馈的光伏清洁机器人偏斜检测和纠偏方法

纠偏方案的总体设计如图 3.2 所示，旨在确保机器人在运行过程中保持稳定的姿态，通过精确监测主电机与从电机的电流数据差异来实现。并且该方案综合运用了先进的量子遗传 PID 控制算法和电流监测技术，以动态调整从电机的速度，从而纠正机器人的偏斜。

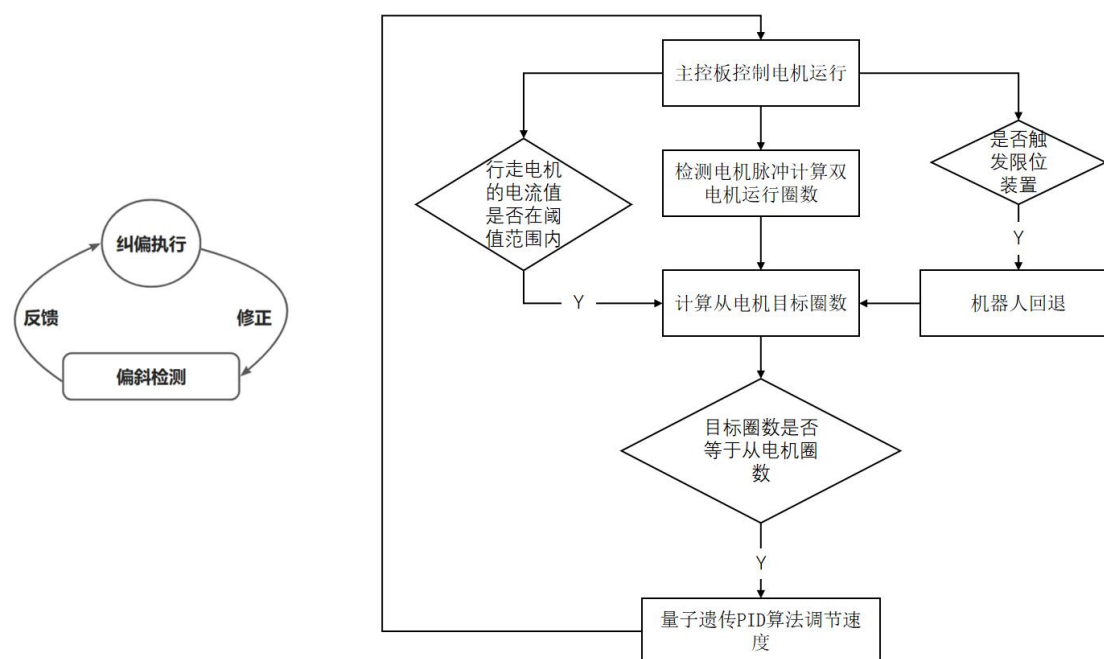


图 3.2 机器人纠偏流程图

首先，机器人实时监测主电机和从电机的脉冲，计算运行圈数。这些数据被送入控制单元进行比较分析，一旦检测到圈数差异，即表明机器人存在姿态偏差。在这种情况下，控制单元将启动量子遗传 PID 控制算法，该算法通过量子遗传优化的 PID 参数，精确地调整从电机的转速，以减少圈数差异，实现机器人姿态的及时纠正。

为了确保机器人在启动前达到平衡状态，该方案要求机器人在到达预定停止点后继续前行一段预定的距离。这段额外的行走时间的存在，使得机器人能够在停机位置进行微调，并确保在下一次运动开始之前保持平衡。在此过程中，设置在停止位置的挡板起到了关键作用，即使机器人有轻微的偏移或者未发生偏移，也不会造成意外掉落，而且在经过这段额外行走后，偏移的一侧也能够达到平衡，为下一次运动做好准备。

当圈数差异为零，但机器人出现偏斜时，系统会通过监测主电机和从电机的电流变化来识别偏斜情况。若超前电机的电流呈现上升趋势，而滞后电机的电流减小，这表明机器人需要进一步的调整。控制单元将根据电流监测数据，动态调整从电机的圈数，以确保机

器人在运动过程中保持平衡。这种实时的电流监测和圈数调整机制，提高了机器人对复杂运行环境的适应性和稳定性。

为了进一步保障机器人的安全运行，系统设计了限位装置。当机器人偏斜超过预定角度时，限位装置将被触发，发出信号指示机器人回退到安全位置。在回退过程中，系统将重新启动纠偏程序，通过前述的圈数差异监测和电流调整机制，确保机器人在重新开始运动前恢复到正确的姿态。这一设计不仅提高了机器人的运行效率，也显著增强了其在面对突发情况时的应对能力。

综上所述，该纠偏方案通过精确的监测、先进的控制算法和安全保护措施，确保了机器人在各种工况下都能维持稳定的姿态，从而提高了其工作效率和可靠性。

3.4 基于电机电流数据反馈的机器人姿态实时监测方案

3.4.1 电机电流监测

在雪天等恶劣环境下，仅仅依靠计算机器运行的圈数可能会遇到一些挑战，因为轮子可能会出现打滑或者机器人受到外部力的干扰导致偏移。在这种情况下，单纯依靠机器人的运行圈数调节可能难以实现有效的控制，因此需要引入主电机和从电机的电流信息。在正常情况下，如图 3.3 所示，电机电流会在一个特定的波动范围内变化。由于主电机通常承载较大负载，其电流值往往高于从电机的电流。

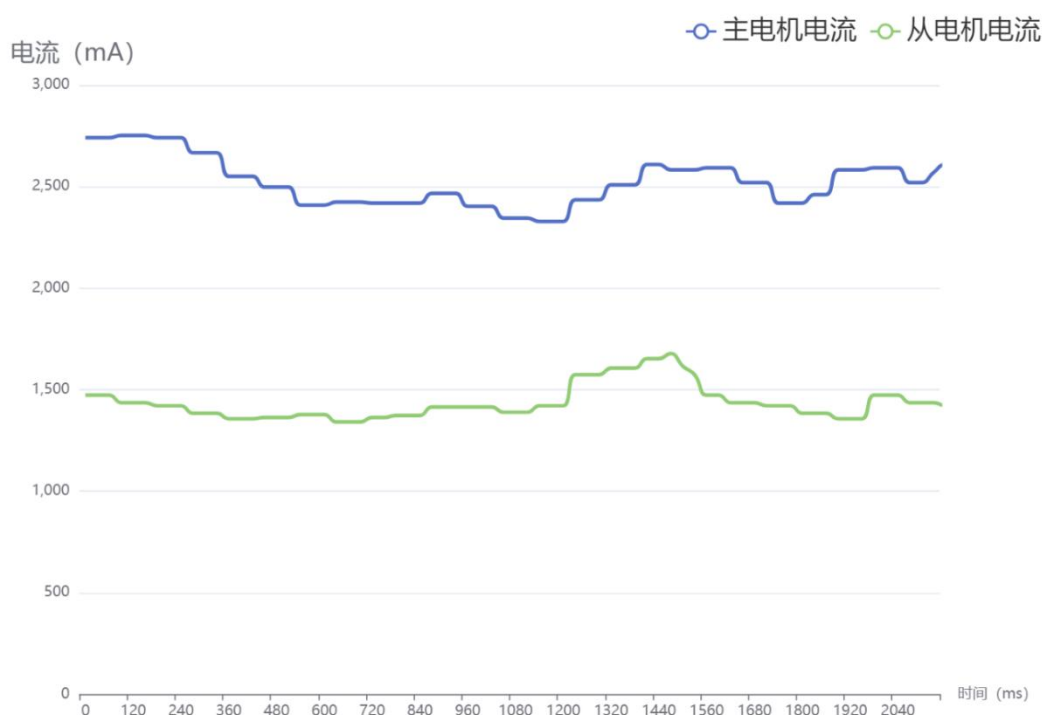


图 3.3 正常情况下的主电机和从电机电流

当机器人发生偏斜时，可以观察到滞后电机的电流呈现减少的倾向，超前的电机电流则会有上升的趋势。在电机不进行调速的情况下进行以下实验：

- (1) 机器人前进时，从电机超前

在这个实验中，首先让机器人向从电机倾斜，并在程序中给予从电机一个初始值，使从电机处于超前状态。然后让机器人前进运行。通过观察图 3.4 可以清晰地看出，从电机的圈数始终大于主电机的圈数。在图 3.5 中，可以明显地观察到主电机的电流逐渐减小，而从电机的电流则逐渐增大。

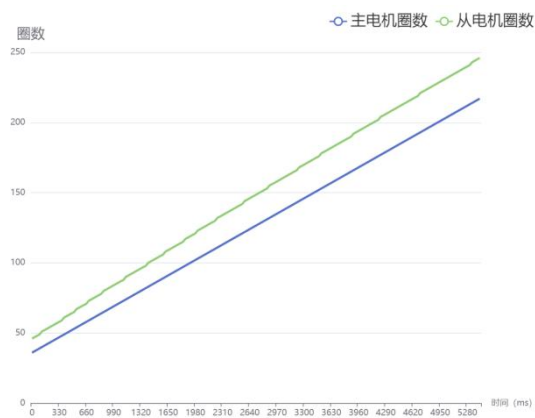


图 3.4 从电机超前时主电机和从电机圈数



图 3.5 从电机超前时主电机和从电机电流

(2) 机器人前进时，从电机滞后

在这个实验中，让机器人的从电机相对于主电机处于滞后状态。通过观察图 3.6 可以清晰地看出，主电机的圈数始终大于从电机的圈数。在图 3.7 中，可以明显地观察到主电机的电流逐渐增大，而从电机的电流则逐渐减小。

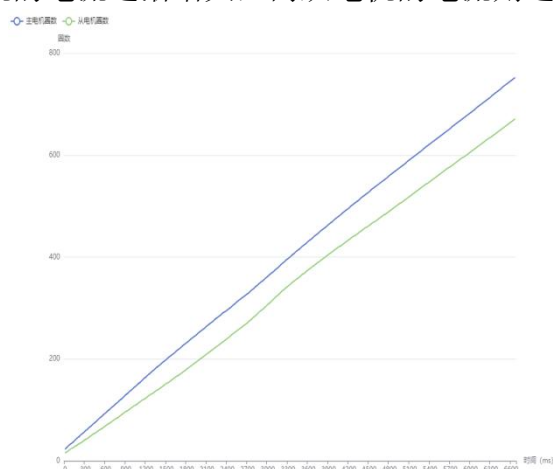


图 3.6 从电机滞后时主电机和从电机圈数



图 3.7 从电机滞后时主电机和从电机电流

由图 3.5 和 3.7 可以明显观察到主电机电流的变化速度较快，而从电机的电流变化则相对较慢。因此，在考虑到机器人在运行时可能受到的风速等因素时，需要根据主电机和从电机电流值的不同变化程度来进行偏置调整。这样可以确保在需要主电机和从电机的电流同时变化以调整速度时，系统能够有效地响应并保持稳定运行。

如图 3.8 所示，依靠电机电流变化对机器人纠偏的流程图。在机器人开始运行的一段时间内，记录主电机的平均电流差值 A1 和从电机的平均电流差值 B1。在机器人的运行过程中实时监测主电机的平均电流差值 A2 和从电机的平均电流差值 B2，若 A2 大于 A1 的 1.5 倍并且 B2 的 1.2 倍仍小于 B1，则表明主电机超前于从电机，需要增加从电机的脉冲。

反之， A_2 的 1.5 倍小于 A_1 并且 B_2 仍大于 B_1 的 1.2 倍，则需要对从电机的电流进行减少。接着，计算从电机的目标圈数，并通过算法对从电机进行调速。

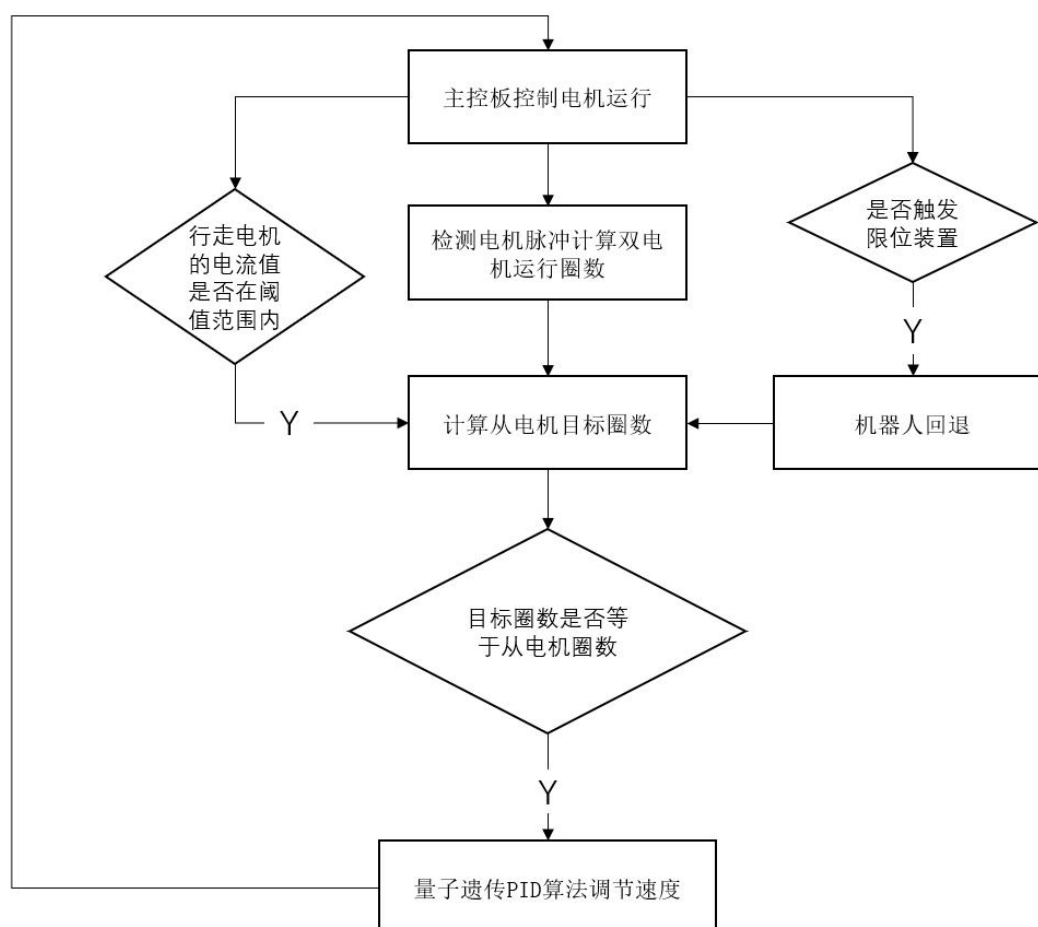


图 3.8 电流补偿调速流程图

采用上述方法，在机器人进行后退时，对进行了从电机的超前和滞后分别进行了调速实验：

(1) 从电机超前

由图 3.9 可观察到，从电机在初始时超前，经过一段时间后，主电机和从电机的圈数差逐渐减少并最终趋于相等。图 3.10 可以看出电机电流随着调速逐渐增大并最终趋于平衡状态。

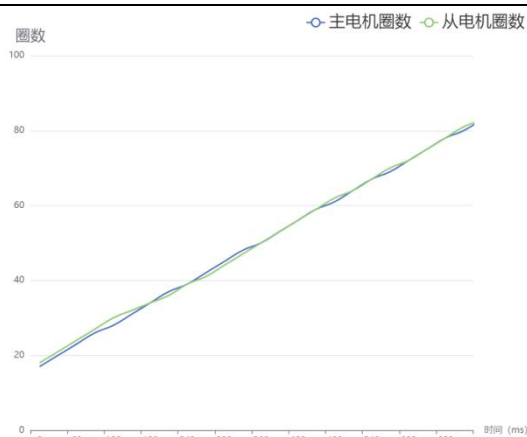


图 3.9 从电机超前调速时主电机和从电机圈数

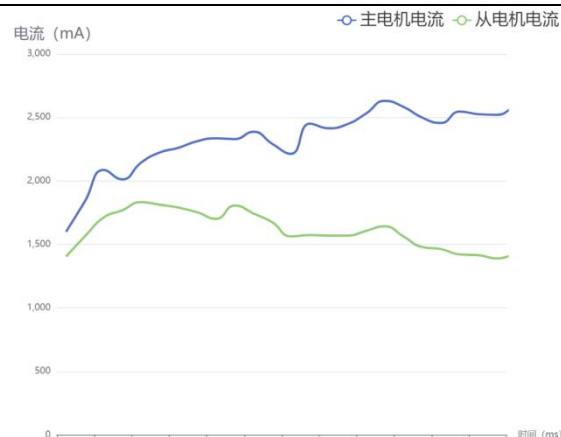


图 3.10 从电机超前调速时主电机和从电机电流

（2）从电机滞后

由图 3.11 可观察到，从电机在初始时滞后，经过一段时间后，主电机和从电机的圈数逐渐减少并最终趋于相等。图 3.12 可以看出电机电流随着调速逐渐减少并趋于平衡。

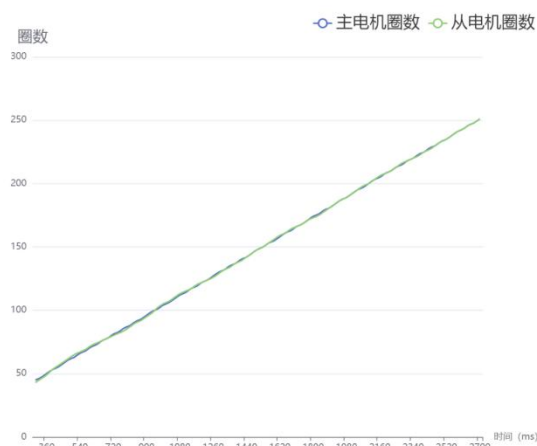


图 3.11 从电机滞后调速时主电机和从电机圈数



图 3.12 从电机滞后调速时主电机和从电机电流

3.4.2 限位装置

为了防止机器人在运行过程中持续偏斜并掉落，在机器人的两侧安装了限位传感器。其设计主要目的是在机器人偏移时，限位装置和光伏板之间产生摩擦力，从而防止机器人脱离光伏板。同时，机器人会实时检测两侧的限位装置状态。如果其中一侧的限位装置未被检测到，这表明机器人出现了偏移。在这种情况下，机器人将采取纠偏措施，以使其重新回到正确的路径上。

如图 3.13 所示，展示了限位装置处理的流程，机器人会持续检测两侧限位装置的状态。如果在 10 秒内两侧限位装置均被触发，说明当前状态正常，机器人可以继续正常运行。但如果在 10 秒内未检测到任一侧限位装置被触发，可能是由于检测装置故障，此时机器人会上报故障，并采取减速停止的措施。另外，如果在 10 秒内检测到任一侧限位装置未被触发，表示机器人出现偏移。在这种情况下，机器人会先回退，然后采取纠偏措施，以使其重新回到正确的路径上。如果经过校准后仍然检测到有限位装置未被触发，机器人将

上报故障并停止运行。通过这一流程，在确保机器人能安全运行或保持在光伏板上的前提下，及时发现并处理任何限位装置故障或偏移情况。

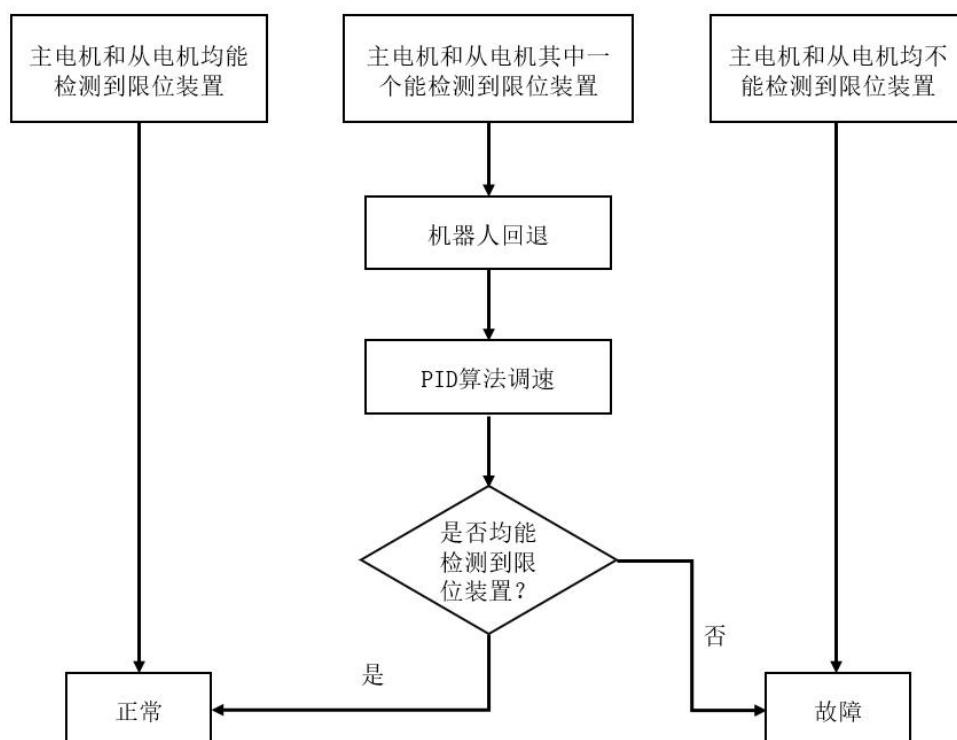


图 3.13 限位检测处理流程图

3.5 基于量子遗传 PID 控制算法纠偏

3.5.1 PID 控制算法

PID 算法是一种常用于控制系统的调节方法，用于根据系统反馈信号来调整控制器的输出，以使系统的行为达到期望状态^[53]。如图 3.14 所示，在机器人的纠偏过程中，PID 算法根据从电机的目标圈数，计算出所需的目标转速，并据此调整从电机的 PWM 信号，以实现对机器人的纠偏控制。具体而言，如果差值较大，表明机器人偏离了预期路径，PID 算法会相应地增加从电机的 PWM 信号，使机器人向纠偏方向移动；反之，如果差值较小，表明机器人接近预期路径，PID 算法则减小从电机的 PWM 信号，以避免过度纠偏。通过不断地调整 PWM 信号，能够使机器人保持在预定路径上，实现有效的纠偏控制。

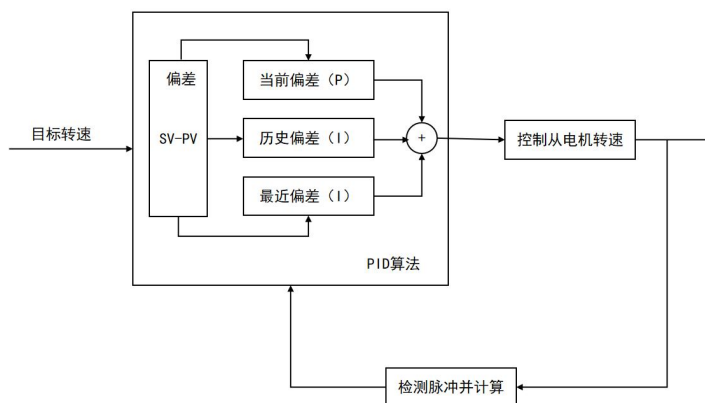


图 3.14 PID 控制系统结构图

PID 控制算法的当前、历史、最近偏差值^[54]对控制的影响：

(1) 当前偏差 (P)：根据系统当前的误差大小，以一定的比例来调节输出。当误差增大时，控制量也相应增大，从而促使系统朝着目标值靠近。具体而言，某一时刻 t ，P 控制根据当前误差值 $e(t)$ 乘以一个比例系数 k_p 来计算控制量 $u(t)$ ，具体计算公式如下：

$$u(t) = k_p e(t) \quad (3.1)$$

(2) 历史偏差 (I)：根据误差随时间的累积量来调节输出，主要用于消除系统的静态误差，确保系统在长时间内能够稳定地接近期望值。具体而言，在某一时刻 t ，积分增益 k_i 乘以从时间 0 到 t 时刻的误差累 $e(t)$ 积量计算控制量 $u(t)$ ，具体计算公式如下：

$$u(t) = k_i \int_0^t e(t) dt \quad (3.2)$$

(3) 最近偏差 (D)：据误差变化的速率来调节输出，主要用于预测系统未来的行为，减少超调和震荡。具体而言，在某一时刻 t ，微分增益 k_d 乘以误差 $e(t)$ 随时间的变化率来计算控制量 $u(t)$ ，具体计算公式如下：

$$u(t) = k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.3)$$

(4) 综上所述，PID 控制算法的公式^[55]如下：

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.4)$$

PID 算法的基本结构，详细步骤如下：

(1) 初始化和定时检查：首先定义一些变量用于存储 PID 计算中的中间结果，并检查是否到了 PID 调节的时间间隔。如果是第一次进入或者达到了设定的时间间隔 100ms，则进行计算；否则，不进行任何操作

(2) 输入目标转速和从电机实际转速：目标转速由主电机转速和行走电机电流差及限位装置的触发状态共同决定。从电机实际转速则是通过驱动芯片检测到的脉冲计算。

(3) 圈数差异检测：检查主电机和从电机的圈数是否有变化。为了避免在电机静止不动时进行无谓的计算，系统需要检查自上次检查以来主电机和从电机的圈数是否发生了

变化。只有当主电机和从电机的圈数自上次检查以来发生了变化，系统才会继续进行 PID 调节。

(4) **PID 计算**：首先需要获取当前的圈数偏差，这表示实际圈数与目标圈数之间的差异。这一步通过从电机和主电机的圈数信息计算得出。接着，计算当前、历史、最近偏差值，并将这三个计算结果相加，得到 PID 控制器的输出增量，即需要调整的 PWM 值。这个增量将加到从电机的实际 PWM 值上。

3.5.2 量子遗传算法

量子遗传算法 (QGA) [56] 是一种融合了量子计算原理与遗传算法的优化技术，具有更高的搜索效率和更广泛的搜索范围。相比于传统方法，它能够有效处理高维参数空间，从而提升了参数优化的精度和效率 [57]。量子计算是指个体的编码方式采用了量子比特 (qubits)，而不是传统遗传算法中的二进制编码。量子比特是量子计算的基本单位，它可以并行表示 0 和 1 这两种状态，还具有量子叠加和量子纠缠等特性。遗传算法 (GA) [58] 是一种模拟生物进化过程的优化算法，它通过模拟自然选择、交叉和变异等机制，逐代地搜索参数空间中的最优解 [59]。

根据图 3.15 量子遗传控制算法的步骤如下：

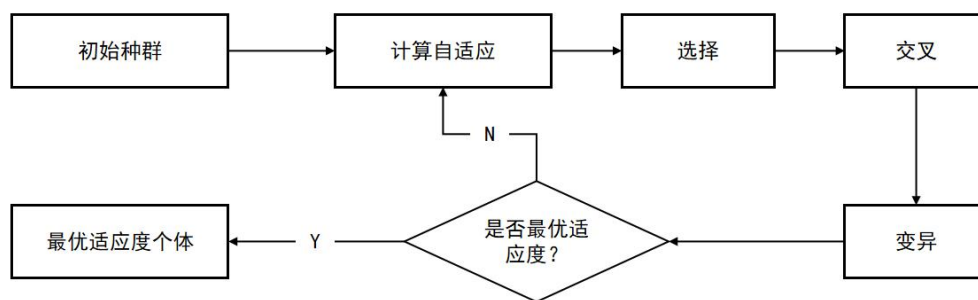


图 3.15 量子遗传算法流程图

(1) **初始化种群**：初始种群由多个量子个体组成，每个量子个体表示一个可能的参数组合。这些量子个体代表了可能的解空间中的候选解。

(2) **量子编码**：每个量子个体的参数被编码为量子态。量子编码使得个体的参数具有量子性质，可以同时表示多个可能的解。

(3) **量子旋转门操作**：引入量子旋转门操作，通过旋转量子比特的相位角度，调整个体的参数。在这个过程中，特别注意调节从电机的目标圈数，以使其逐步接近设定的目标值。

(4) **量子叠加和量子测量**：量子个体经过旋转门操作后处于多个可能的状态之间，通过量子测量得到确定的解，即调整后的参数组合。

(5) **计算适应度**：对于每个确定的解，通过控制系统模拟机器人运行，计算其适应度值。适应度函数考虑了系统的稳定性、转速误差、达到目标圈数的时间等指标。

(6) 选择和繁殖：根据适应度值，选择适应度较高的量子个体作为父代，然后进行繁殖操作。在这一步骤中，特别关注从电机目标圈数的调整，以使下一代量子个体更好地适应系统运行需求。

(7) 重复迭代：重复进行上述步骤，直到达到预设的终止条件。在每次迭代中，通过不断调整从电机的目标圈数，使得机器人的运行更加稳定和准确。

(8) 输出结果：在算法结束后，输出具有最优适应度的量子个体对应的参数组合，作为最终的优化结果。

3.5.3 量子遗传 PID 控制算法

传统 PID 控制算法需要手动调节参数。首先，如果比例系数设置过大，系统可能会产生震荡和超调，而如果设置过小，系统又可能无法快速达到期望值，导致控制性能下降。其次，积分时间设置不当可能导致积分饱和或者系统不稳定，因为过小的积分时间会导致积分项无法消除持续性误差，而过大的积分时间则可能导致积分项积累过多，引起系统不稳定。另外，微分时间设置过大可能会使系统对噪声敏感，产生振荡，而设置过小则可能导致微分项影响不足，无法有效抑制系统的震荡。在实际工程中，调节 PID 参数可能耗费大量时间和精力。

为了解决这个问题，引入了量子遗传 PID 控制算法。该算法将量子遗传算法应用于 PID 控制器参数的优化过程中，通过优化 PID 控制器的比例系数、积分时间和微分时间等参数，以提高控制系统的稳定性和性能。相对于传统的 PID 参数调节方法，量子遗传 PID 控制算法具有更快的全局最优解搜索速度，同时能够处理高维参数空间，从而提高了参数优化的精度和效率。

图 3.16 是量子遗传 PID 控制算法的流程。根据算法计算的结果，调整 PWM 的值。若计算得到的 PWM 值超过电机可调节的 PWM 上限，则将 PWM 值设置为上限，以确保 PWM 值在电机可调节的范围内。调整后的 PWM 值用于调节电机速度，以减少主电机和从电机间的圈数差异。

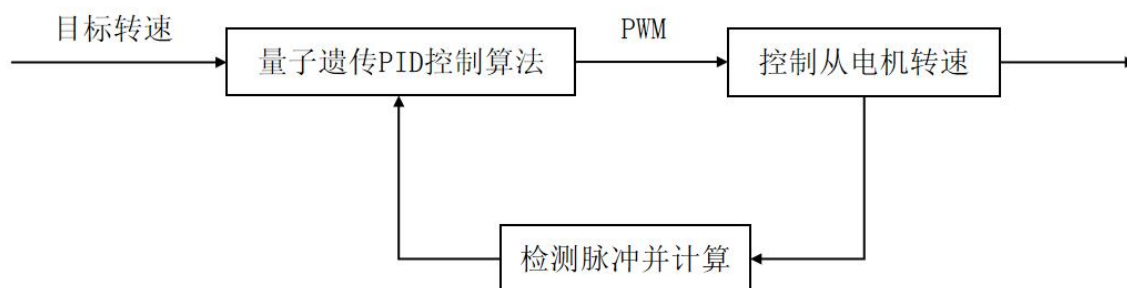


图 3.16 量子遗传算法流程图

如图 3.17 所示，完成本次调节后，使用系统时钟记录当前的时间作为 PID 调节的起始时间点，这一步是为了确保 PID 算法在适当的时间间隔内进行，以及准备下一次 PID 调节。

在每次进行 PID 调节时，都会检查当前时间与上一次 PID 调节的时间间隔是否达到预设的时间周期。如果达到了时间周期，就可以执行 PID 算法计算和相应的控制调节；如果时间间隔尚未达到预设的时间周期，则继续等待，直到满足条件时触发最新的 PID 调节请求。

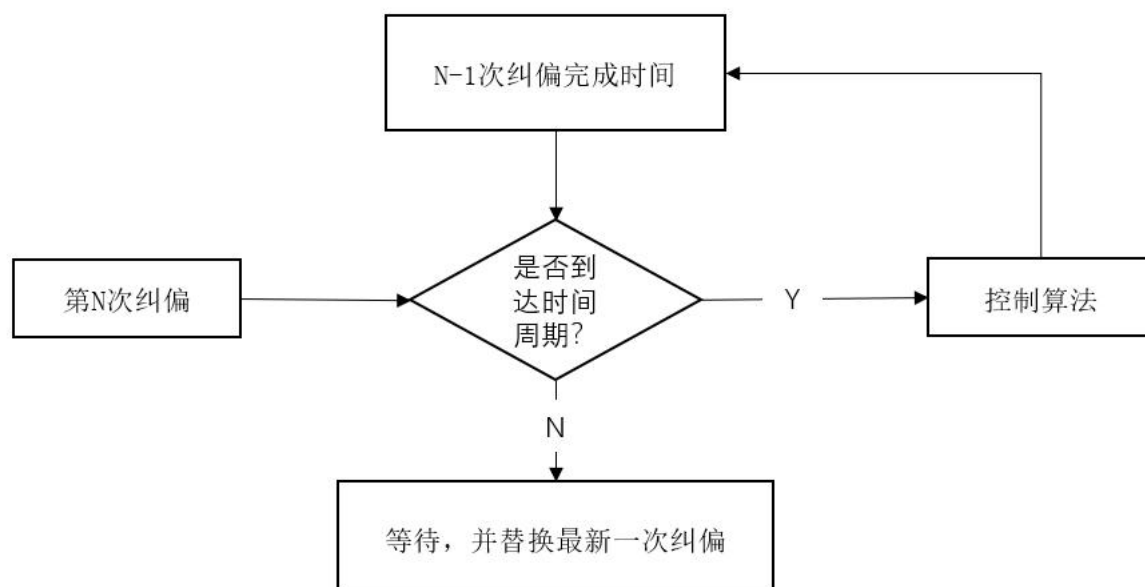


图 3.17 控制算法时间间隔触发流程图

3.5.4 纠偏执行

如图 3.18 所示，电机运行包括以下步骤：首先，主控芯片接收到一条运行的指令，并根据设置的运行速率的大小生成相应的 PWM 信号，并将其输出到 PWM 转模拟量模块，PWM 信号被转换成相应的模拟电压信号。驱动芯片接收模拟电压信号后，会相应地输出 PWM 信号到电机控制模块^[60]。最终，电机控制模块根据接收到的 PWM 信号，启动电机并使其开始运行。

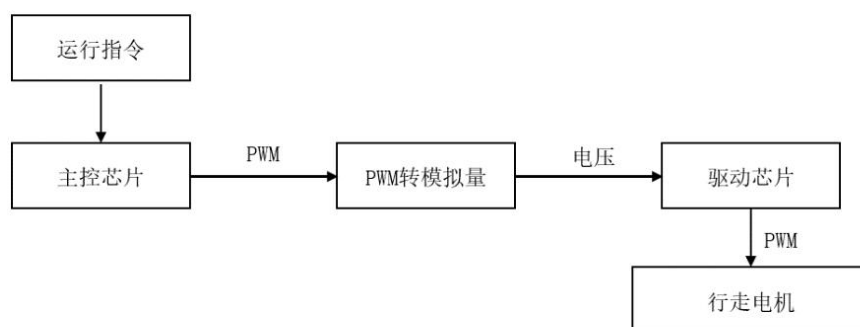


图 3.18 脉冲监测流程

PWM 转模拟量模块使用的是 GP8101 转换器，能够将 0%至 100%占空比的 PWM 信号输入，经线性转换后输出的模拟电压。它具备高精度和高线性度，输出电压误差小于 1%，

线性度误差小于 0.5%。处理频率在 50Hz 至 50KHz 之间，且高电平电压介于 3.0V 至 5.5V 的 PWM 信号^[61]。此外，它还具有低功耗、快速启动、广泛的工作温度范围等特点。

主控芯片会根据平台或应用程序在控制板参数中预设的行走电机的速度要求来调整 PWM 信号的占空比，从而控制输出模拟电压的高低。运动速度的设定值越高，相应的 PWM 占空比也就越大，导致输出的直流电压越大，转速也越快。

驱动芯片使用的是 TB6575FNG 三相全波无刷直流电动机 PWM 无传感器控制器，它设计用于提供无传感器换向和 PWM 电流控制，从而实现对电机转速的控制。它通过模拟输入来调整 PWM 的占空比，允许用户根据需求轻松改变电机的速度。TB6575FNG 具备多项特征，包括三相全波无传感器驱动、PWM 斩波器驱动和过电流保护，以及正反转控制，提供了超前角控制选项和重叠换向功能，以优化电机的运行效率和性能等^[62]。

驱动芯片具备两种模式：分别是 DC 励磁模式^[63]和无传感器模式^[64]。在电压值大于 1 时，也就是机器人处于启动阶段，尤其是在负载较重或需要平滑启动的情况下，采用 DC 励磁模式。这有助于克服电机初启动时的静摩擦力，确保机器人平稳启动。当驱动芯片引脚 9 的电压达到供电电压的一半时，表示电机启动并达到一定转速，驱动芯片会从 DC 励磁模式强制转换成无传感器模式。这种转换有助于优化电机的性能，降低能耗，同时减少对外部传感器的依赖。

主电机和从电机是一种三对级电机，需要经过三个旋转磁场才能启动和运行。简单来说，这意味着需要依次引入三次电流，从而使电机达到预定的运行状态。在一个三相电机系统中，一对级通常会产生三个脉冲，因为每个相位的电流变化会引起一个脉冲。因此，当存在三个对级时，总共会产生九个脉冲。每个脉冲都包括高电平和低电平两个状态，这些状态的持续时间决定了电机的周期。频率等于电机周期的倒数，电机设置的减速比是 28.05，每分钟的实际输出转速的公式如下：

$$\text{实际输出转速(每分钟)} = \text{频率} \times 60 \div \text{电机减速比} \quad (3.5)$$

如表 3.4 所示，统计了不同电压下电机的周期，并计算了周期与输出轴转速。

表 3.4 不同电压下实际输出轴转速

输出电压 (V)	转一圈的周期 (ms)	频率 (HZ)	输出轴转速 (圈/min)
1.5	88.80	11.26	24.09
2.0	37.50	26.67	57.73
2.5	23.80	42.02	89.88
3.0	18.70	53.48	114.39
3.5	15.24	65.62	140.36
4.0	12.96	77.16	165.05

3.6 实验结果分析

为了验证量子遗传 PID 控制算法的效果，如图 3.19 和图 3.20 展示了迭代次数为 50 次时遗传算法和量子遗传算法的对比曲线图。观察结果显示，QGA 算法比 GA 算法更快地达到了目标值，并且其所需的迭代次数也更少。这说明 QGA 算法在优化过程中具有更高的效率和更快的收敛速度，能够更有效地搜索到最优解。这是归因于 QGA 算法引入了量子计算的特性，利用量子叠加和量子测量等操作，使得搜索过程更加并行和高效。

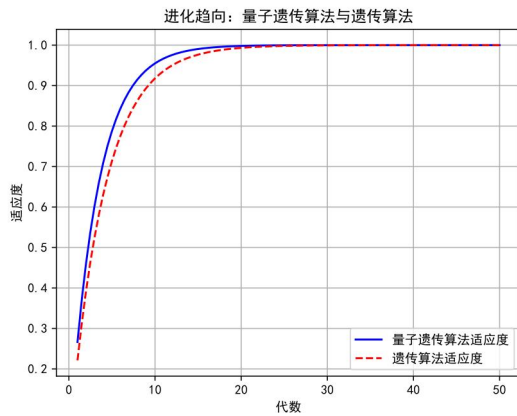


图 3.19 遗传算法和量子遗传算法适应度对比曲线图

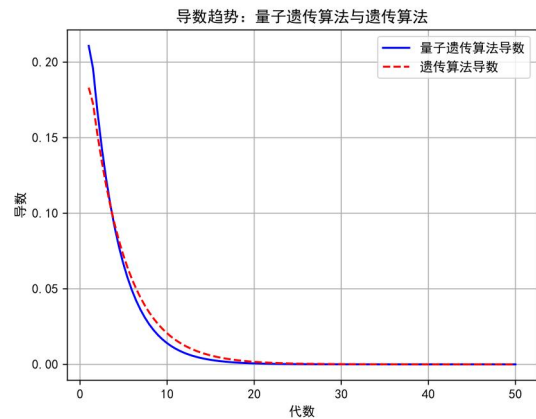


图 3.20 遗传算法和量子遗传算法导数对比曲线图

为了验证纠偏的准确性，在相同环境下进行了机器人的运行测试。如图 3.21 所示，展示了机器人在没有发生偏斜时的电流曲线。而图 3.22 则展示了人为控制偏斜后，机器人自动进行矫正的电流曲线。通过对这些曲线的分析和计算平均值，发现机器人的电流纠偏平均速度为 1.19 秒，并且波动较小。这表明所提出的纠偏方法能够在实际运行中快速而准确地检测到偏斜，并自动对其进行纠正，使得机器人能够及时恢复到正常的运行状态。

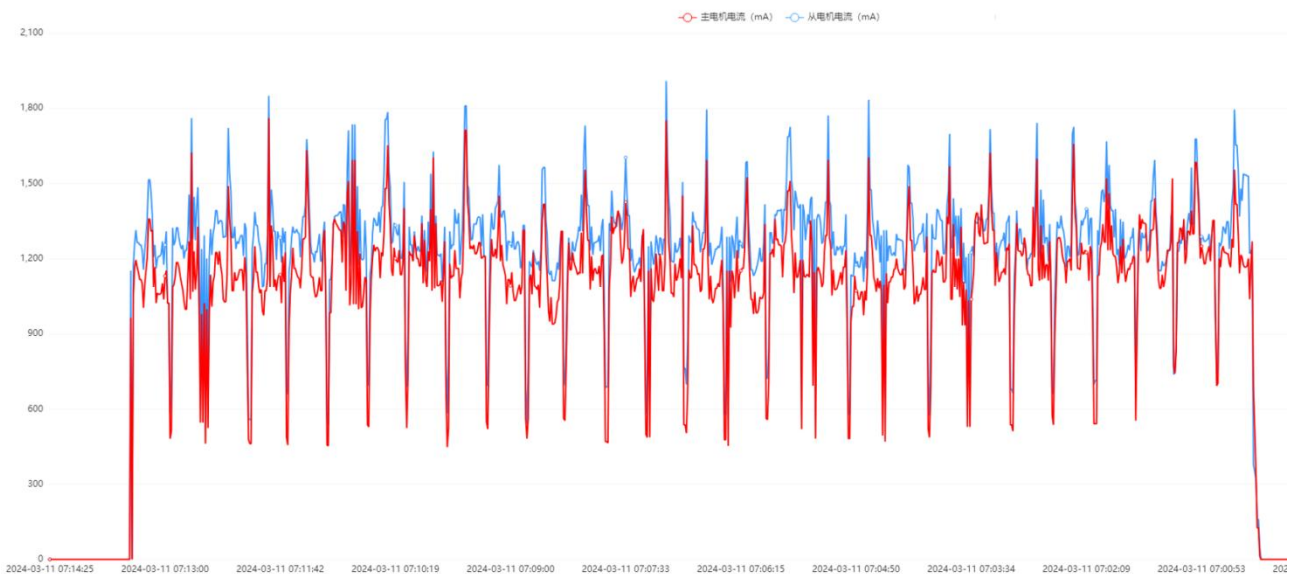


图 3.21 无偏差时电流波形

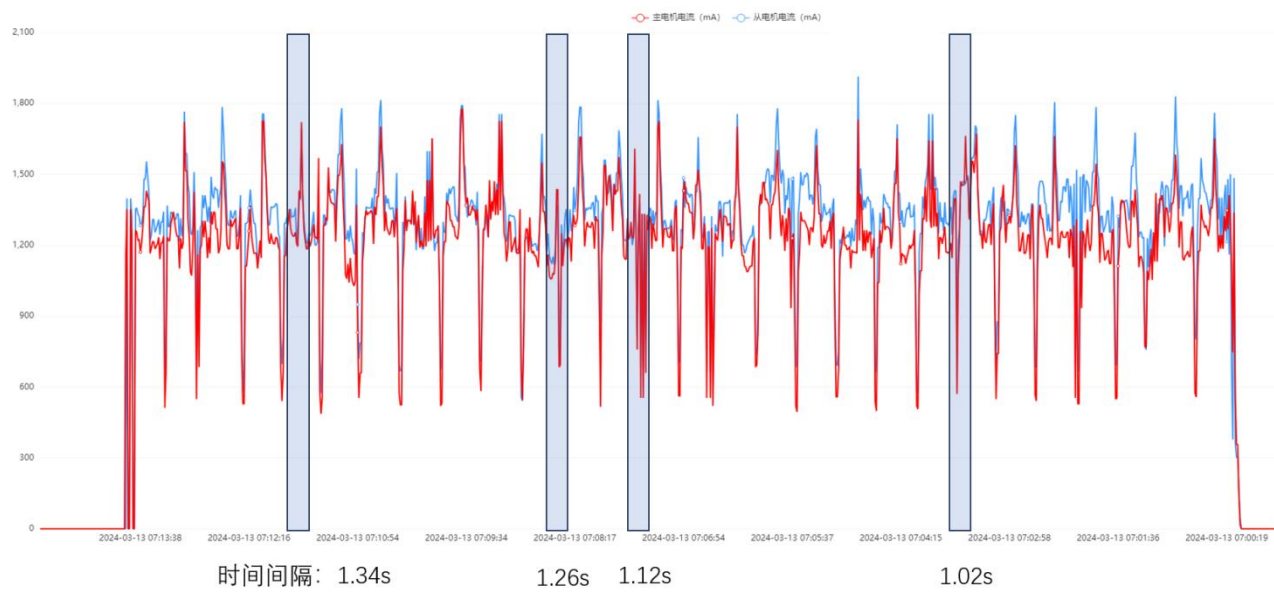


图 3.22 产生偏差时电流波形

3.7 本章小结

本章重点关注光伏清洁机器人在运行中可能出现的偏移问题，并提出了相应的偏斜检测方案和量子遗传 PID 控制算法。

首先，经过对纠偏方案现状的比较分析，考虑到光伏机器人运行环境的特殊性和操作条件的严苛性，以及光伏阵列需要依赖跟踪支架调节角度的需求，选择了检测行走电机运行圈数的差值、行走电机电流补偿脉冲、限位装置是否触发对调节从电机目标圈数。接着，对 PID 控制算法进行了详细介绍，它通过比例、积分和微分环节来调节控制器的输出，以实现系统对期望状态的控制。随后，引入了量子遗传算法，结合了量子计算和遗传算法的优势，能够更快地搜索参数空间并找到全局最优解，提高了参数优化的效率和精度。最后，通过实验结果分析验证了量子遗传算法在优化过程中的高效性和快速性，以及纠偏方法的准确性和可靠性。

综上所述，通过合理选择纠偏方案和引入相应的控制策略，光伏机器人能够有效地纠正偏斜问题，保证了其在清洁过程中的稳定性和可靠性，从而提高了光伏板清洁的效率和质量。

第 4 章 基于电流数据 GRU 模型的机器人行进位置检测方法

为了实现对清洁机器人运行位置的实时检测，确保其按照预定路线进行清洁任务，及时发现机器人停滞在光伏板中间等异常情况，本章提出了一种基于电流数据 GRU 模型的机器人行进位置检测方法。该方法主要通过分析机器人在运行过程中经过每块光伏板时的电机电流变化特征来获取位置信息。首先，获取机器人运行时的电流波形数据，然后利用 GRU 模型对波形进行学习和预测，以捕捉关键特征。接着，采用离散小波变换进行多尺度分析，以识别波形的细微特性，特别是在运行过程中产生的波谷数量。根据波谷信息，通过阈值筛选出所需数据，从而准确获取机器人的位置。该检测方法准确率高，便于实现，并适用于机器人实际使用场景，具有较高的实用价值。

4.1 位置监测方法研究及分析

在光伏清洁机器人的应用领域中，准确掌握机器人的位置对于确保其安全运行以及提升清洁效率和质量具有重要意义。正确的位置信息不仅能够及时揭示和处理潜在的运行故障，保障机器人的安全运作，而且通过对这些数据的分析，有助于进一步优化清洁作业流程，提高作业效率。此外，精确的位置跟踪还能使维护团队迅速定位和响应，有效减少维修时间和成本，为系统的未来升级和改进提供了重要的数据支持。这一系列措施突出了主要目的：方便在机器人出现故障时，运维人员能够迅速找到其具体位置，以便进行及时维修和保障光伏清洁机器人的正常运行。

机器人的运行环境如图 4.1 所示，存在着由多个光伏板组成的光伏阵列，这些光伏板通过桥架连接在一起，形成一个整体的能量收集系统。控制着光伏阵列方向的是跟踪支架，它可以根据太阳的位置调整光伏板的角度，以最大程度地吸收太阳能。而在光伏板之间支撑和固定的结构则被称为支撑支架，它起着保持光伏板稳定的作用。根据光伏系统的特点，机器人在系统中行走时，负载在不同位置会发生变化。当机器人经过光伏阵列时，清扫光伏板会增加负载；在经过光伏板之间的空隙时，负载相对减小；而在经过桥架时，负载变得更小。随着负载的变化，电机所需的电流也会相应变化，因此可以利用电机电流的变化来判断机器人相对于光伏阵列和桥架的位置，从而实现机器人的定位和导航。

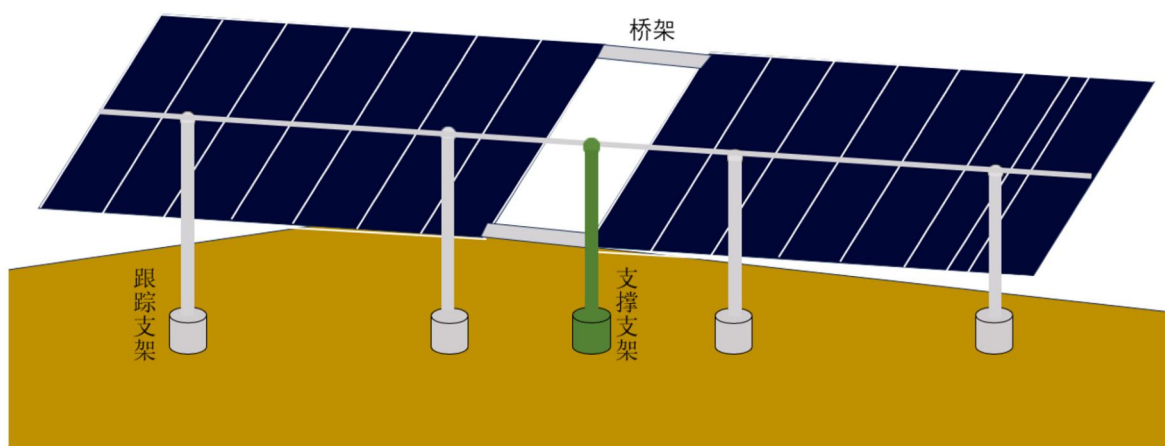


图 4.1 光伏系统部分结构图

基于分析机器人的主机电流检测所在位置的整体设计方法如图 4.2 所示。包括采集、存储、处理主电机的电流数据、使用模型预测波形、离散小波变换分析波形、阈值法分析机器人的具体位置。

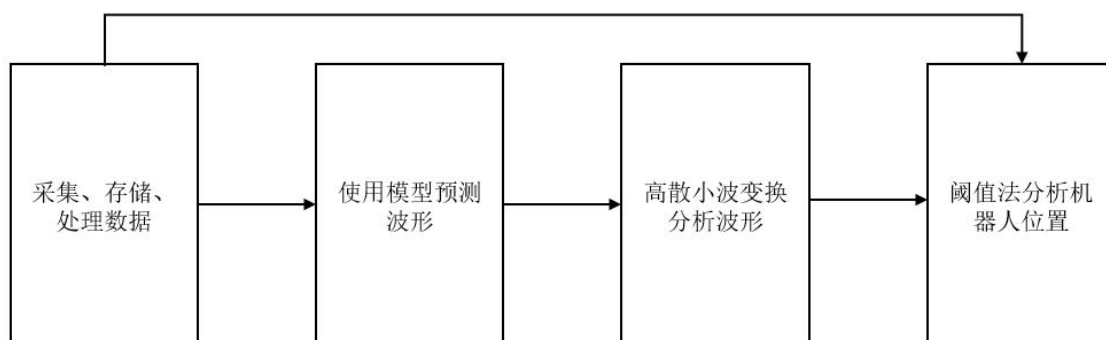


图 4.2 位置检测整体设计流程图

4.2 数据采集与处理

4.2.1 数据采集和存储

本系统使用了 CC6903 作为传感器进行数据采集。CC6903 是一款适用于交流或直流电流检测方案的单端输出线性电流传感器。它内置了一条低阻抗的主要电流传输线和一款精确、低噪的线性霍尔传感器。在传输电流过程中，霍尔传感器会检测到相应的磁场变化，并转换成电信号，该信号随后被处理并输出为电压形式。经过测试，主机电流的范围在-20A 到+20A 之间。将电压 V_{OUT} 解析成电流 I_p 计算公式如下：

$$I_p = (V_{OUT} - V_{cc}/2)/S \quad (4.1)$$

式中，灵敏度 S 为 66mV/A，电源电压 V_{cc} 为 3.3V。

除了实时监测主电机的电流数据外，为了减少数据分析的量并更全面地了解设备的运行状态，还需要实时采集设备的运行状态信息。这些状态信息包括设备的工作状态，例如离线、清扫中，以及可能出现的故障和预警情况，如表 4.1 所示。每个嵌入式上报状态都使用 32 位来表示，其中每一位代表设备状态下的细小状态。举例来说，在清扫中的状态下，需要记录当前的运行模式、启动状态以及前进方向等细节信息。而当设备出现故障时，需要详细记录具体的故障原因，如充放电控制器故障、电机控制板故障等。而预警状态则需要记录可能引起注意的情况，如主电机上限电流预警、电池高温保护等。

表 4.1 设备上报数据状态解析表

状态	设备状态
FA	清扫中
FB	离线
FC	故障
FD	预警

在数据采集过程中，特别关注了各种环境因素对电流数据的影响，包括负载变化、电池状态、温度、电机老化等因素。针对负载变化，在不同负载情况下进行了数据采集，以覆盖各种工作负载下电流波形的变化情况。对于电池状态，通过对电池充放电过程中的电流数据进行采集，考虑了电池容量、充电状态等因素对电流的影响。同时，在不同温度范围下进行了数据采集，以模拟机器人在不同环境温度下的工作情况。此外，还考虑了电机老化对电流特性的影响，通过长时间的实验和测试，获取了电机老化过程中的电流数据。通过对这些数据的采集，能够全面了解各种环境因素对电流波形的影响，为模型的训练提供了丰富的数据基础。

成功完成数据采集后，为了有效地保存所采集的数据和相应的设备状态，采用了一套完整的数据处理流程，如图 4.3 所示。首先，将解析的电流数据和设备状态通过 Flash 进行存取和读取。Flash 是一种非易失性存储器，它具有能够在断电或重新启动后保留数据的特性，因此非常适用于存储需要长期保留的数据^[65]。储存成功后，可以根据需要将其分包发送到网关。网关将电流值及当前状态上报到 ChirpStack 平台。ChirpStack 平台接收到数据，它会将接收到的数据推送到后台程序。后台程序接收到数据后，会先将其推送到消息队列中。消息队列的作用是提高接收数据的速度，防止丢失数据。通过消息队列，可以确保数据能够按顺序稳定地传输到后续的处理环节，从而保证数据的完整性和可靠性。消息队列的消费者会监听到数据，并进行解析和处理。在这个过程中，数据会被解析成可读的格式，并根据预先设定的规则进行处理。

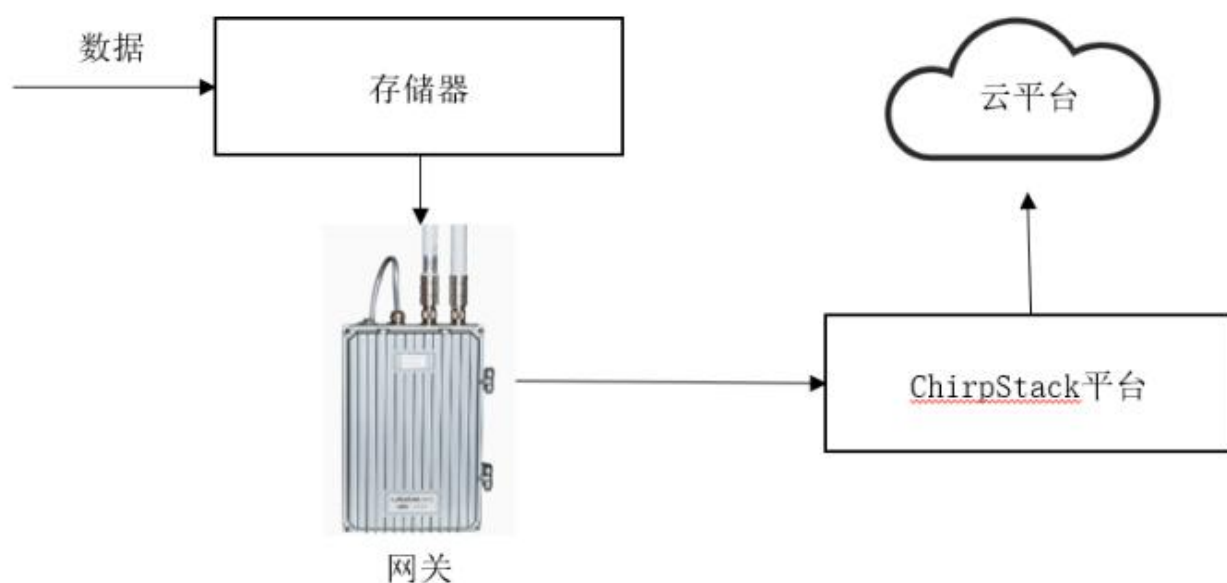


图 4.3 数据储存处理流程图

4.2.2 数据处理

在处理设备状态不是离线的机器人电流数据时，采用低通滤波是一种常见的方法，旨在消除电流数据中的高频噪声，从而得到更加平滑和稳定的数据。低通滤波器允许通过低频信号，同时抑制高频信号，因此可以有效地去除电流数据中的高频部分，保留其趋势和变化的低频成分^[66]。

低通滤波处理函数接受三个参数：采集的电流信号、滤波器截止频率和信号的采样率。首先，函数计算了信号的奈奎斯特频率，即采样率的一半。然后，计算了截止频率与奈奎斯特频率的比值，用于设计滤波器。接下来，函数利用四阶巴特沃斯低通滤波器^[67]，根据给定的截止频率，返回滤波器的分子和分母系数。最后，函数将这些系数应用于输入的采集电流信号，执行线性滤波操作。该操作通过将输入信号与滤波器系数进行卷积运算，从而得到平滑后的信号。最后通过调整滤波器截止频率和信号的采样率，根据具体的应用需求来控制滤波器的效果，从而得到满足实际需求的平滑信号，得出截止频率是 0.8，信号采样率是 6.0。这样处理后的波形图如图 4.4 所示，可以更好地反映机器人电流数据的实际情况，去除了噪声和高频成分，使得数据更加稳定和可靠。

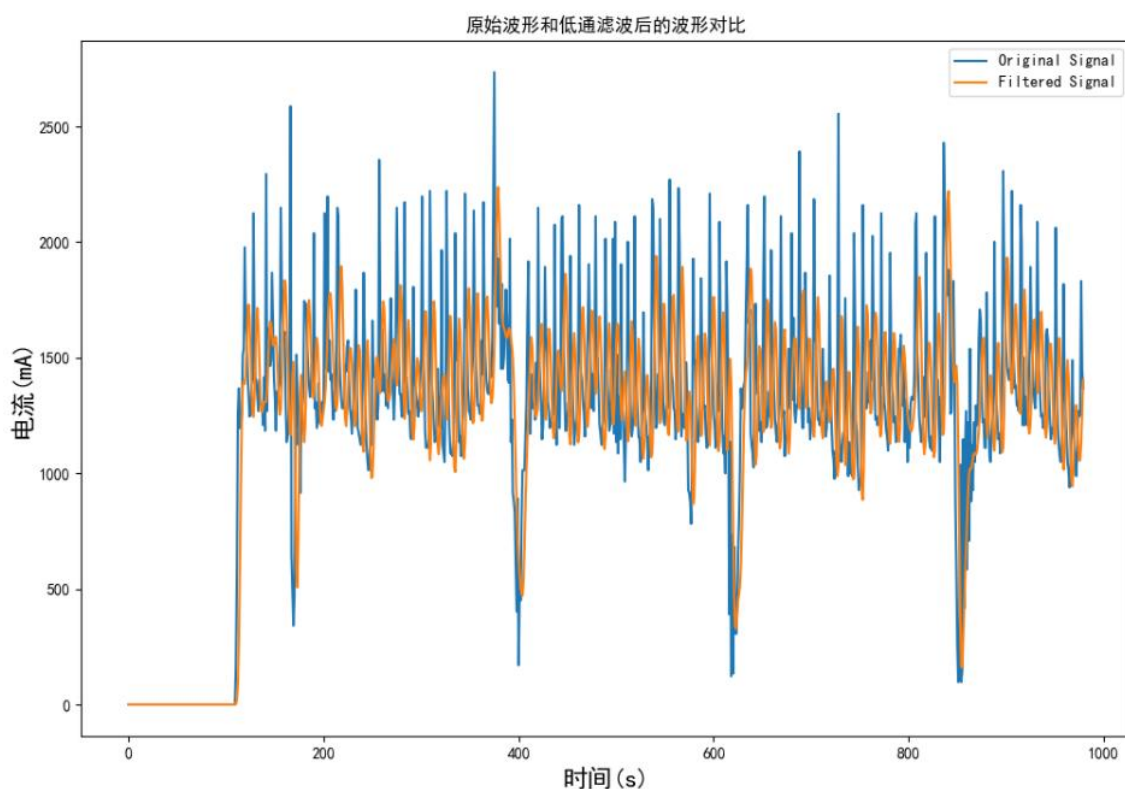


图 4.4 原始电流波形和低通滤波后的电流波形对比图

低通滤波处理完成后，平滑的数据将被存储到 MySQL 数据库中，以支持后续的数据分析和应用开发。在将数据存储到 MySQL 数据库中之前，通常需要定义数据库表结构，包括列名、数据类型以及索引等信息。数据库表结构定义完成后，建立与数据库的连接，以将数据插入到数据库表中。在插入数据之后，可以通过执行 SQL 查询语句来检索和分析数据。这些查询可以用于生成报告、可视化数据、执行统计分析等。此外，还可以使用 MySQL 提供的存储过程和触发器等功能来进一步处理和管理数据。

4.3 GRU 模型预测波形

4.3.1 GRU 模型原理

如图 4.5 所示，GRU 模型是一种循环神经网络的变体，用于处理序列数据。GRU 模型相对于长短期记忆网络（LSTM）来说，在结构上更加简单，具有更少的参数，因此训练起来通常更加高效^[68, 69]。GRU 模型将 LSTM 中的输入门和遗忘门合并成了一个更新门（Update Gate），并且引入了一个重置门（Reset Gate），这样使得模型的结构更加简洁，减少了参数数量。

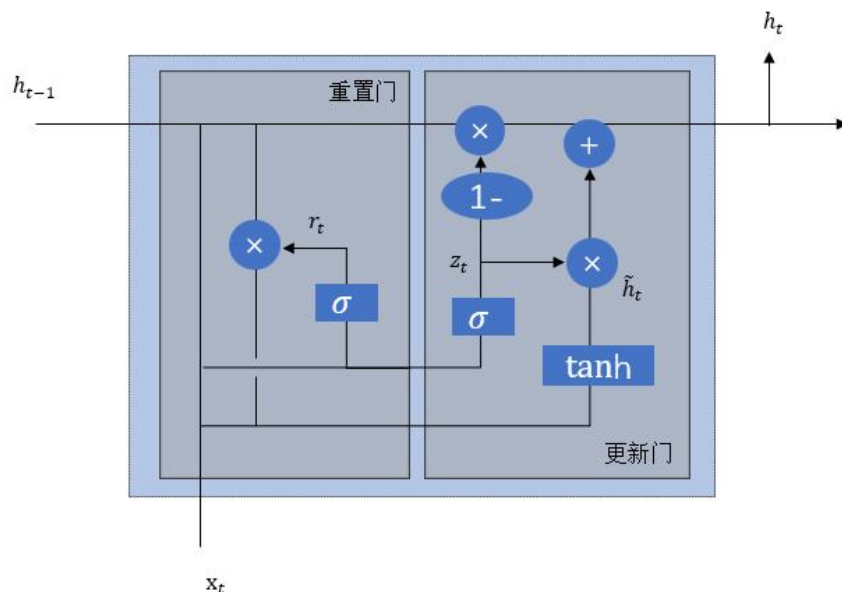


图 4.5 GRU 结构图

重置门控制着过去信息对当前时间步的影响。它接收当前时间步的输入和前一个时间步的隐藏状态，然后输出一个介于 0 和 1 之间的值，表示应该保留多少过去的信息。重置门 r_t 的计算公式可以表示为：

$$r_t = \sigma(W_r[h_{t-1}, x_t] + b_r) \quad (4.2)$$

式中， σ 为 sigmoid 函数， W_r 为权重矩阵， h_{t-1} 为前一个时间步的隐藏状态， x_t 为当前时间步的输入， b_r 为偏置向量。

更新门控制着当前信息对当前时间步的影响。它也接收当前时间步的输入和前一个时间步的隐藏状态，然后输出一个介于 0 和 1 之间的值，表示应该保留多少当前的信息。更新门 z_t 的计算公式可以表示为：

$$z_t = \sigma(W_z[h_{t-1}, x_t] + b_z) \quad (4.3)$$

式中， W_z 为权重矩阵， b_z 为偏置向量。

候选隐藏状态表示了当前时间步的候选隐藏状态，其计算基于当前时间步的输入和前一个时间步的隐藏状态，候选隐藏状态 $\tilde{h}_t$ 的计算公式可以表示为：

$$\tilde{h}_t = \tanh(W[r_t \odot h_{t-1}, x_t] + b) \quad (4.4)$$

式中， W 为权重矩阵， b 为偏置向量。

更新隐藏状态表示了当前时间步的最终隐藏状态，它是根据候选隐藏状态（4.4）和更新门（4.3）的输出计算得到的，更新隐藏状态 h_t 的计算公式可以表示为：

$$h_t = (1 - z_t) \odot h_{t-1} + z_t \odot \tilde{h}_t \quad (4.5)$$

4.3.2 GRU 模型建模

在数据存储到数据库后，机器人到达页面的数据会经历多个阶段，包括采集、存储、下发以及滤波等过程，这些过程都会带来一定的延迟。为了及时了解机器人当前的位置，

需要通过 GRU 模型进行预测，并根据预测的波形来分析机器人所处的位置。整个预测波形的流程如图 4.6 所示。

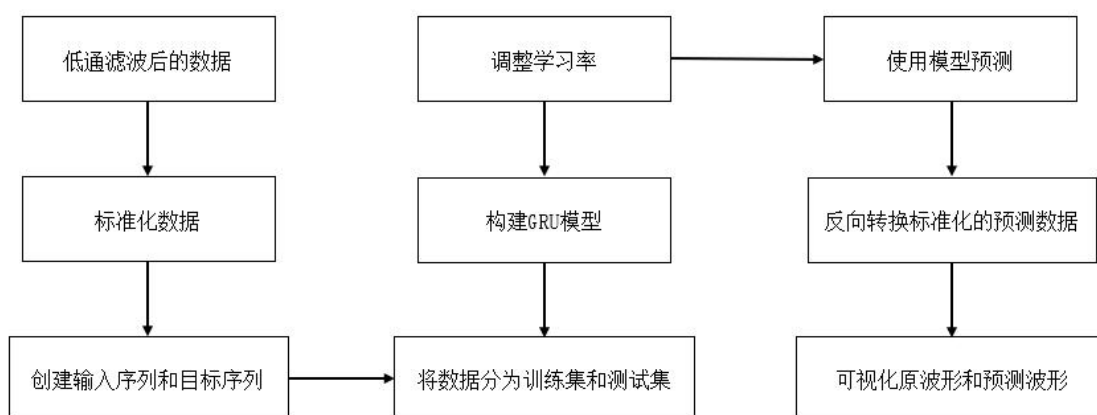


图 4.6 GRU 模型流程图

预测波形的详细步骤如下：

（1）对数据库的数据进行标准化，是预处理步骤中的关键一环。标准化确保了数据具有零均值和单位方差，这有助于加快模型的训练速度，并且能够更好地处理不同尺度的数据。通过标准化，能够消除数据之间的量纲差异，使得数据更具可比性和可解释性。在标准化过程中，将每个特征减去其均值，然后再除以其标准差，从而实现对数据的标准化处理。

（2）创建输入序列和对应的目标序列，以供模型训练。这一步是将时间序列数据转换为监督学习问题的关键步骤。通过定义输入序列和目标序列，可以将时间序列数据组织成样本和标签的形式，使得模型能够学习数据的内在规律和趋势。输入序列通常包括前一段时间窗口内的数据，而目标序列则是接下来时间步的数据。

（3）为了有效地训练和评估模型，数据集应当被分割为两个部分：训练集和测试集。训练集用于模型的学习过程，而测试集则用于评估模型性能。通过划分数据集，能够在训练过程中检验模型的泛化能力，确保模型能够对未见过的数据进行准确预测。常见的划分比例是 80% 的数据用于训练，20% 的数据用于测试，并且将训练集和测试集的数据能够充分覆盖各种情况，这样可以充分利用数据并且保证测试结果的可靠性。

（4）使用 Keras 建立 GRU 模型，首先考虑到多种因素的影响，如不同负载、温度、电池状态等，需要充分考虑这些因素，并采用合适的输入特征表示这些变化情况。一个基本的 GRU 模型包括一个 GRU 层和一个全连接层。通过 GRU 层对序列数据进行特征提取和表示学习，然后通过全连接层对 GRU 层输出进行进一步处理，最终得到模型的输出。在建立模型时，需要注意设置合适的超参数，如隐藏单元数量、学习率、损失函数等，并进行数据预处理和模型评估，以确保模型能够在给定的任务上达到良好的性能。

(5) 在构建 GRU 模型之后, 需要调整学习率和编译模型。学习率是控制模型参数更新速度的重要超参数, 通过使用 Adam 优化器并设置适当的学习率, 可以有效地训练模型, 并且提高模型的收敛速度。为了准确评估模型在时间序列预测任务上的表现, 选择合适的损失函数至关重要。一般而言, 我们会采用相关系数和决定系数作为评价指标, 它们能够量化模型预测输出与实际观测数据之间的一致性和拟合优度。

(6) 对模型进行训练。在训练过程中, 将数据分为小批量进行处理, 这有助于加快模型的训练速度, 并且能够更好地利用计算资源。通常情况下, 会选择一个适当的批量大小, 并在每个时期对整个数据集进行多次迭代训练, 直到模型收敛或达到设定的训练次数。

(7) 训练完成后, 可以使用训练好的模型对测试集进行预测。通过将测试集中的不同负载、温度、电池状态等数据输入到模型中, 可以得到模型对未来时间步的位置预测结果, 这些预测结果通常是标准化的, 以确保模型对数据的处理方式一致。

(8) 将预测结果进行反标准化, 将其转换回原始数据的尺度。通过反标准化, 可以得到与原始数据相同尺度的预测结果, 从而更好地理解模型的预测能力。最终, 通过可视化工具将原始波形和预测波形进行对比展示, 以评估模型的性能, 并且为进一步的数据分析和应用开发提供参考依据。

4.4 离散小波变换

为了分析预测波形的波峰, 使用了 Haar 小波对 GRU 模型预测的波形进行离散小波变换, 将信号分解成近似系数和细节系数。选择小波变换的原因在于其多尺度分析的特性^[70-72], 这使得我们能够更精确地检测和定位机器人在光伏板上的位置。相较于传统的变换方式, 小波变换具有以下几个优势:

(1) 小波变换是一种多尺度分析工具, 能够同时捕捉不同频率范围内的信号特征。这对于处理复杂的电流数据非常重要, 因为在光伏板上可能存在多个尺度的波峰。机器人位置感知通常涉及到不同频率范围的信号, 小波变换能够更好地适应这种情况。

(2) 小波变换具有时频局部化的特性, 允许对信号的局部特征进行更准确的描述。对于在时间和频率上变化较快的电流数据, 这一特性非常关键。相比之下, 传统的变换方式可能在时频局部化上表现不如小波变换优越。

(3) 通过小波变换, 可以更精确地定位信号中的波峰, 因为它能够提供每个时刻波峰的幅度和位置信息。这对于机器人在光伏板上的精确定位至关重要。

(4) 小波变换能够适应非平稳信号, 即其统计性质随时间变化。在电流数据时, 这一优势尤为突出, 因为机器人主电机的电流数据通常是非平稳的。相比之下, 小波变换相对于其他变换方式更具优势, 因为它能够更灵活地适应信号的变化。

使用基于 Haar 的离散小波变换对信号进行分解, 将其分解成近似系数和细节系数的设计步骤如下:

(1) 初始化参数。获取输入信号的长度，这将决定了变换的级数和分解的尺度。其次，需要定义 Haar 小波的滤波器系数，包括一个尺度系数和一个波函数，用于对信号进行分解和重构。

(2) 初始化输出数组。初始化一个输出数组，这个数组的长度与输入信号相同。这个数组将被用来存储小波变换的结果。在进行存储时，需确保有足够的空间来保存近似系数和细节系数，这两者构成了小波变换的关键输出内容。近似系数反映了信号的整体趋势和主要特征，而细节系数揭示了信号的局部变化和细节特征。

(3) 小波变换的迭代过程。小波变换的迭代过程涉及对信号进行多尺度的处理。在这个过程中，通过迭代，对信号进行多次小波变换，以获得不同尺度下的信号分解。迭代的次数通常由信号的长度决定，一般为 $\log_2 n$ 次，其中 n 表示信号的长度。在每次迭代中，我们将信号分解为近似部分和细节部分。这种分解方法可以逐步地获得信号在不同频率范围内的特征，了解信号的时频特性和局部结构。迭代过程的重要性在于它能够对信号进行多尺度的分析，从而更全面地了解信号的特征和变化规律。这种多尺度分析对于处理复杂的信号数据尤为重要，因为信号可能具有不同尺度上的波动和特征。因此，通过迭代的小波变换过程，我们可以更加准确地捕捉信号的特征，为信号处理和分析提供更为可靠的基础。

(4) 对信号的多尺度分解和特征提取。以下是对每个尺度的小波变换的改写步骤：首先，在处理每个尺度的小波变换时，将信号从左到右以步长为 $2^{(i+1)}$ 进行切片，这个步骤类似于信号的分解，通过按照固定的步长对信号进行划分，捕获不同尺度下的信号信息。尺度级别 i 是一个关键参数，它控制着小波变换的分辨率和精度。尺度等级 i 的确定是通过计算 n 的以 2 为底的对数，并向下取整得到的结果。然后将每个切片与 Haar 小波滤波器进行卷积操作。如图 4.7 所示的 Haar 小波滤波器是一组特殊设计的滤波器，能够有效地捕获信号的局部特征。通过与这些滤波器进行卷积，可以得到该尺度下的细节系数。得到细节系数后，将其扩展并放回原信号相应的位置。这一步骤是为了保持信号的原始长度，并且将细节系数融合回原始信号中，以便后续的信号重构或分析。通过这一核心步骤，将信号分解成了不同尺度下的细节系数，从而实现对信号的多尺度分析和特征提取。

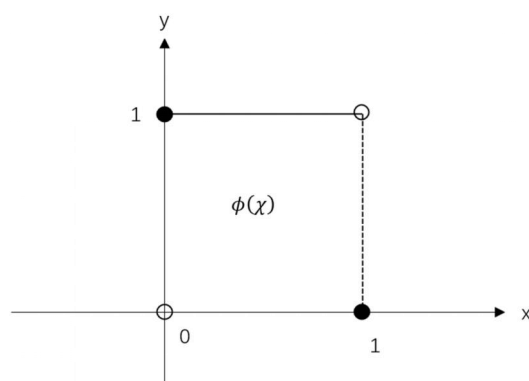


图 4.7 Haar 尺度函数

4.5 阈值法分析位置

考虑到机器人在桥架和光伏板上的负载不同的情况，需要采取不同的方法来识别机器人所处的位置。首先，考虑到机器人要经过桥架的情况，由于负载较小，桥架上的波谷会相对较大。因此，可以直接使用低通滤波器对原始数据进行处理，得到波形的低频成分，即桥架上的波形。然后，设定一个阈值，当波形低于阈值时，表示机器人经过了一个桥架。云平台根据机器人所绑定的清扫路径，可以确定机器人所在的光伏阵列。

另一方面，在光伏板上，由于相邻板块之间存在连接点，这些连接点处的负载相对较小，而光伏板正常工作时，会形成波峰。为了识别机器人所在的光伏板，可以利用小波变换的细节系数。设定一个阈值，通过检测小波变换的细节系数的绝对值大小，来确定波峰的位置和数量，从而确定机器人当前位于哪块光伏板上。

综上所述，使用两次阈值法后，如图 4.8，平台可以有效地确定机器人所在的光伏阵列以及光伏阵列上光伏板的位置。

基本信息		区域编号 00001
机器人编号	00104	停机位 ⏸
清扫路径编号	1001	
光线传感器状态	正常	
License	永久授权	
EUI	EUI001	
光伏阵列	Tracker-0005	运行模式 👉 手动
光伏板	Block-0001	

图 4.8 管理平台位置信息

4.6 实验结果分析

4.6.1 GRU 模型预测波形实验结果

如图 4.9 所示，利用 GRU 模型和 LSTM 模型进行波形预测后，将它们与实际波形进行对比，可以明显观察到 LSTM 模型的预测波形与实际波形存在一定的偏差，而 GRU 模型的预测波形几乎与实际波形完全重合。相比之下，GRU 模型在波形预测方面表现出更高的准确性和更强的泛化能力。此外，对预测波形的要求是能够准确地预测到阈值低于 700mA 的波谷及其位置。从图中可以明显看出，预测波形完全满足了这一要求。

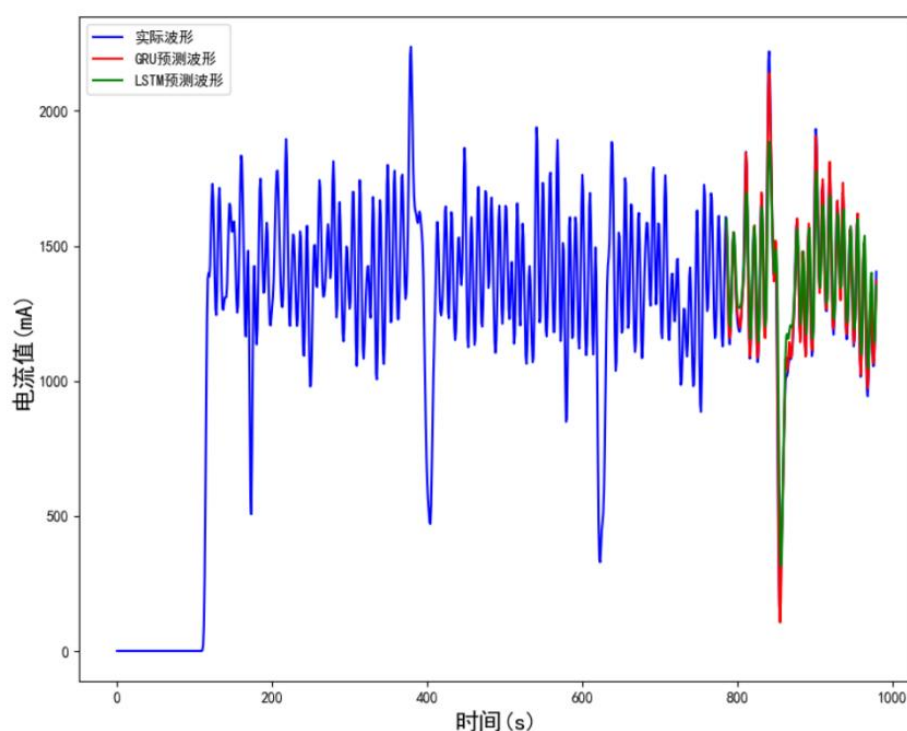


图 4.9 实际波形、GRU 预测波形和 LSTM 预测波形对比图

表 4.2 显示了 GRU 和长短期记忆网络 (LSTM)、常规循环神经网络 (RNN) 模型在波形预测方面的性能对比, 主要通过相关系数和决定系数这两个评价指标来进行衡量。相关系数用于评估两个变量之间线性关系的强度及其方向性, 其值介于 -1 和 1 之间。具体而言, 当相关系数接近 1 时, 意味着两个变量之间存在较强的正向线性关联。而决定系数反映了模型对数据变化的解释程度, 其值域介于 0 至 1 之间。当决定系数接近 1 时, 说明模型能够很好地解释数据的变异性, 预测结果与实际观测值的拟合程度较高。

表 4.2 GRU 模型和 LSTM 模型对比

模型	相关系数	决定系数
GRU 模型	0.9910	0.9897
LSTM 模型	0.9814	0.9697
RNN 模型	0.9728	0.9226

结果表明, GRU 模型在波形预测方面呈现出更高的相关系数和决定系数, 表明其对观测数据的拟合程度更佳, 能够更准确地预测目标波形。相比之下, LSTM 模型和 RNN 模型的相关系数和决定系数略低。

4.6.2 位置检测实验结果

图 4.10 是根据预测波形检测波谷的数量, 从而确定机器人所在的光伏阵列。结果显示, 每个波谷均成功检测到, 确保了机器人的准确定位。

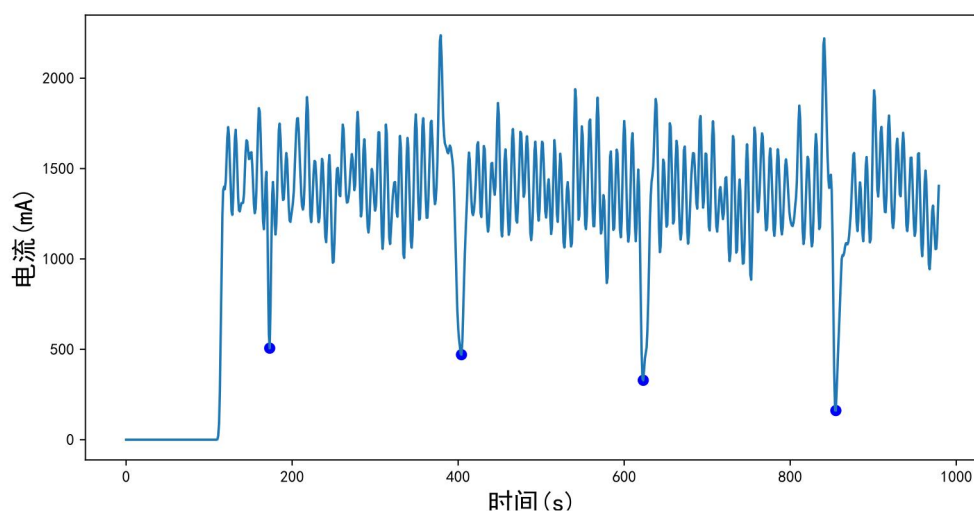


图 4.10 预测波形波谷检测

图 4.11 是根据小波变换后检测到的波峰数量，从而确定机器人所在的光伏阵列的特定光伏板位置。

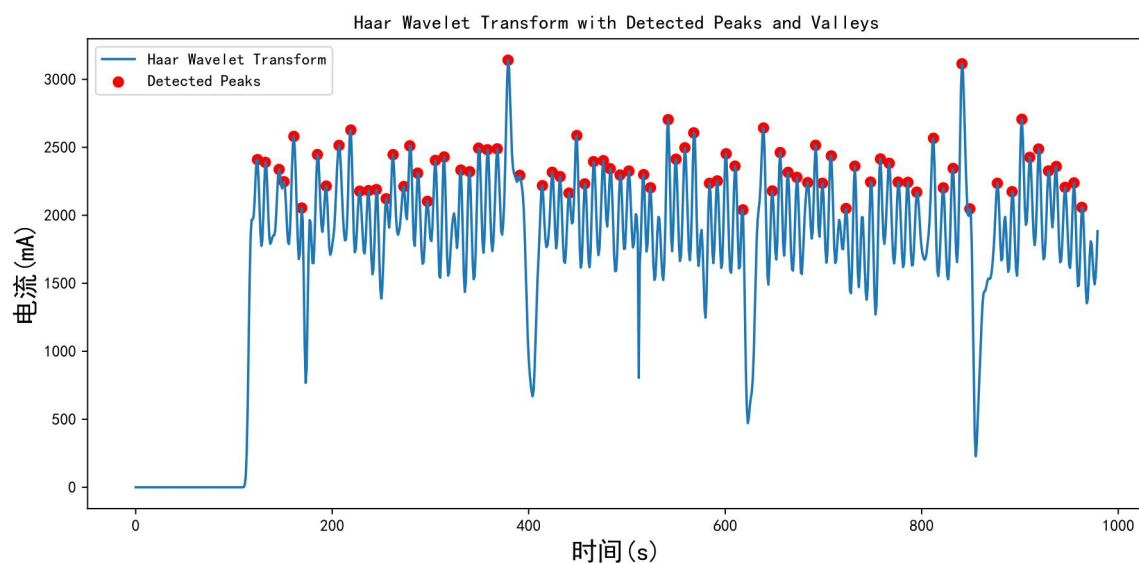


图 4.11 离散小波变换的波形峰值检测

为了确定机器人的位置，即确定其所在的光伏板位置，可以通过比较统计的机器人经过的光伏板数量和实际数量来评估位置的准确性，如果这两个数量一致，就表明机器人所在的光伏板位置检测是准确的。于是根据图 4.10 检测到的预测波形的波谷数量和图 4.11 检测到的离散小波变换后的波形波峰的数量，表 4.3 根据波峰波谷的数量统计了光伏板的数量。从表中可以得知，所统计的光伏板数量与实际数量一致。这一结果表明了通过离散小波变换进行多尺度分析波形的可靠性。进一步地，这也再次验证了使用 GRU 模型进行波形预测所得到的数据与实际情况高度吻合。这种一致性不仅证实了模型的准确性，也强化了其在预测光伏板性能方面的可信度。

表 4.3 光伏板计算数量与实际数量对比

跟踪支架	光伏板数量	实际数量
Tracker-0001	6	6
Tracker-0002	22	22
Tracker-0003	22	22
Tracker-0004	22	22

为了切实检验位置检测系统的精确度，构建了一个模拟的作业场景，并在云平台上安排了机器人执行定时清扫任务。机器人被编程每天在清晨 4 点启动，对光伏板进行清洁，同时，光伏板的跟踪支架角度会根据实时数据进行调整以模拟日常操作。此次测试的目的是全面评估位置检测系统在连续两周的实际运行中的表现。根据表 4.4 的数据，可以观察到机器人能够一致地准确识别每块光伏板，这一点从跟踪支架的检测数量中得到了体现，没有出现数量异常或缺失的情况。表 4.4 统计了支架上光伏板的数量，实际数量为 22，在第 3 天和第 9 天均有一个支架出现了计算错误，根据公式 4.6 计算出的预测光伏板位置的准确率达到了 96%，且光伏板预测数量在正负 1 的范围内，这一结果充分证明了位置检测系统的可靠性和高效性。

$$\text{准确率} = 1 - \text{计算错误的支架数} / (\text{天数} * \text{路径上的支架数}) \quad (4.6)$$

表 4.4 机器人位置预测结果

天数	Tracker-0001	Tracker-0002	Tracker-0003	Tracker-0004
第一天	22	22	22	22
第二天	22	23	22	22
第三天	22	22	22	22
第四天	22	22	22	22
第五天	22	22	22	22
第六天	22	22	22	22
第七天	22	22	22	22
第八天	22	22	22	22
第九天	21	22	22	22
第十天	22	22	22	22
第十一天	22	22	22	22
第十二天	22	22	22	22
第十三天	22	22	22	22
第十四天	22	22	22	22

4.7 本章小结

本章主要是为了解决了传统清洁机器人在光伏板上位置感知准确性不足的问题。首先，通过收集光伏清洁机器人主电机的电流数据，并采用低通滤波器对其进行处理，去除高频噪声，提高了电流数据的质量。进一步引入 GRU 模型对滤波后的数据进行预测，从而提高了位置感知的精度。然后通过小波变换模块对预测数据进行处理，将信号分解成近似系数和细节系数。最终，使用阈值法对滤波后的电流数据进行波谷检测，以确定当前机器人位于哪个光伏阵列上。随后，再利用阈值法对小波变换后的数据进行波峰检测，进一步确定机器人位于光伏阵列上的哪块光伏板上。这一多层次的处理流程结合了信号处理和人工智能技术，显著提高了机器人在光伏板上的位置感知精度，并增强了其适应各种复杂环境条件的能力。

该设计方法结合了机器人电流值的特征和光伏板设计的特点，实现了对机器人位置的准确检测。引入 GRU 模型进行深度学习处理进一步提高了检测结果的准确性。通过 Haar 小波变换检测峰值，可以精确捕捉到机器人的位置特征，为机器人的大致位置提供了初步的判断。最终，该系统将传统信号处理与深度学习技术相结合，提升了机器人的智能程度，使其能够更好地适应环境变化，从而提高了清洁作业的效率和质量。

第 5 章 总结与展望

5.1 全文总结

本文主要围绕光伏清洁机器人系统设计展开，从研究背景和意义、国内外研究现状开始，逐步深入探讨了光伏清洁机器人的系统设计、基于电机电流数据分析的位置检测方法以及机器人纠偏技术研究与应用等内容。本文所做的工作可总结为以下几点：

（1）在系统设计方面，详细介绍了光伏清洁机器人的总体设计、硬件设计和软件设计，包括充放电控制器、主控板、通信模块、电机控制板等各个部分的设计和函数。同时，还对后端架构和应用层设计进行了阐述，包括用户端系统、设备端系统、监控运维系统以及 WEB 前端设计、APP 设计等方面的内容。

（2）在机器人纠偏技术研究与应用部分，通过对不同纠偏方案的对比分析，提出了一种基于电流数据反馈的光伏清洁机器人偏斜检测和纠偏方法，并详细介绍了电机电流监测、限位装置以及量子遗传 PID 算法的原理和应用。同时，对纠偏方案进行了全面的对比分析后，发现采用基于电流数据反馈的纠偏方法，在提升光伏清洁机器人纠偏性能的同时，也有效简化了操作流程并减少了相关的成本投入。

（3）在基于电机电流数据分析的位置检测方法部分，详细介绍了数据采集与处理、GRU 模型预测波形、离散小波变换以及阈值法分析位置等方法，用于实现对机器人位置的准确检测和定位。

5.2 未来的工作展望

本文旨在设计一款适用于沙漠地区和可调整角度的光伏阵列的挂式光伏机器人。考虑到机器人涉及的领域广泛，因素复杂，以及本人在相关领域的经验和技术水平有限，未来仍需探索 and 解决诸多关键问题：

（1）机器人纠偏的依赖性，除了考虑电流和限位装置外，还可以加入其他变量来共同调节电机的目标转速，以适应不同的环境和任务需求。这些变量可以包括但不限于集成环境感知技术，如摄像头、红外或超声波传感器，以便机器人能够感知周围环境并做出相应的调整。

（2）机器人在运行过程中可能会发生偏移问题，目前的解决方案主要是通过监测电流值是否超出预设的阈值来调整机器人的位置。为了进一步提升机器人的定位精度和纠偏效率，未来的改进计划将考虑引入先进的算法。该算法将通过分析机器人在正常运行状态下的电流与时间之间的关系，建立起一个基准模型。利用这个模型，我们可以更准确地分析机器人在发生偏斜时的电流变化，从而判断出机器人的具体姿态和位置。

(3) 机器人位置检测方面的复杂性，引入了多层次的流程，包括电流数据处理、深度学习模型、小波变换等，需要更多的硬件资源和算力支持，增加了系统的复杂度和成本，也增加了系统维护和调试的难度。

(4) 机器人位置检测方面的局限性，主要适用于挂式光伏清洁机器人。对于便携式光伏清洁机器人，其设计和工作方式可能与挂式机器人有所不同，因此需要重新考虑和调整位置检测方法。便携式光伏清洁机器人通常不依赖于轨道进行移动，而是通过自身的机动性在光伏板之间移动。因此，传统的电流数据采集和位置感知方法可能无法直接适用。相比之下，便携式机器人可能需要更加灵活和智能的位置感知技术，以适应不同形状和布局的光伏板。之后将对便携式光伏清洁机器人电流数据研究，观察运行在两个光伏板之间以及桥架处的特征。

致谢

在这即将完成学业时，我想要衷心感谢所有在我研究旅程中给予支持和帮助的人们。

首先，要感谢我的导师陈科明教授，您的耐心和鼓励是我前行的动力。无论是在研究方向的确定还是在解决问题时，您都给予了我宝贵的指导和支持。不论是研究还是生活中，在我曾一度陷入迷茫时，您总是给我带来启发和信心。您的关心与支持使我能够克服挑战，不断进步。在我需要技术支持或者面对学术困惑时，您总是耐心解答，给予我无私的指导。

同时，也特别要感谢我的同门，你们的经验分享和建议让我受益匪浅。在学术讨论和研究探讨中，我们共同成长，相互鼓励，共同度过了许多难忘的时刻。你们的友谊和合作精神让我的研究之旅更加丰富和有意义。

感谢我的实习公司轨物科技有限公司，在公司平台的支持下，我才有机会将学到的理论知识应用到实践中，才能在不断地实践中完善我的想法。在项目中，我面临了许多挑战，但正是这些挑战让我学到了更多，获得了宝贵的经验。从处理技术问题到与团队合作，到关于工程项目管理和团队协作的技能，我都学习到了宝贵的经验，这些将成为我未来职业发展的宝贵资产。

感谢我的家人和朋友们在我求学过程中的支持和鼓励。你们的理解、支持和鼓励是我坚强前行的动力源泉，我会永远珍惜你们的情谊。

最后，我要感谢所有对我论文提出建议和意见的专家、老师和同行们。在你们的指导下，我不断完善论文，提高了学术水平，受益匪浅。

参考文献

- [1] 袁亮,张通,张庆贺等.双碳目标下废弃矿井绿色低碳多能互补体系建设思考[J].煤炭学报,2022,47(06):2131-2139.
- [2] 陈国平,董昱,梁志峰.能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5493-5506.
- [3] 王绍绍.国家能源局:2023年全国累计发电装机容量同比增长13.9%[N].人民日报,2024-01-36.
- [4] 叶伟.上调装机规模光伏业实现高增长[N].中国高新技术产业导报,2024-01-01(011).
- [5] 王万乐.光伏发电双轴跟踪系统的研究与设计[D].山东科技大学,2018.
- [6] 郭志文.光伏跟踪系统支架梁结构多参数优化设计及避风控制策略研究[D].江西理工大学,2023.
- [7] 塔娜.光伏行业现状及前景分析[J].企业改革与管理,2018,(22):204-205.
- [8] 郭丽菲.“光伏卫士”让光伏板清洁更加简单高效[N].山西青年报,2022-03-28(006).
- [9] 王书平.屋顶分布式光伏电站发电量影响因素分析[J].电力安全技术,2023,25(12):17-20.
- [10] 牛海明,崔青汝,刘厚旭.积灰对光伏电池板输出特性影响研究[J].热力发电,2021,50(02):110-117.
- [11] 徐志明,曲宏伟,王靖雯等.太阳能光伏板积灰的最佳清扫周期[J].中国电机工程学报,2018,38(6):5.
- [12] 张楚,陈栋才,陈湘萍等.多应用场景下储能最优配置经济性效益分析[J/OL].储能科学与技术:1-12.
- [13] 金胜利,郭振兴,干建丽等.光伏电站组件清洁技术研究综述[J].能源工程,2023,43(05):1-11.
- [14] 杜健超,孙卫红,马冠宇.基于拉丁超立方体抽样的六自由度机械臂工作空间分析[J].组合机床与自动化加工技术,2016,(07):30-33.
- [15] Hammoud M, Shokr B, Assi A, et al. Effect of dust cleaning on the enhancement of the power generation of a coastal PV-power plant at Zahrani Lebanon[J]. Solar Energy, 2019, 184:195-201.
- [16] 徐梦雪.基于深度学习的图像识别技术综述[J].计算机产品与流通,2019,(01):213.
- [17] 徐校竹.基于深度学习的矿岩图像识别技术研究[J].中国锰业,2018,36(06):179-181.
- [18] 郭景华,李克强,罗禹贡.智能车辆运动控制研究综述[J].汽车安全与节能学报,2016,7(02):151-159.
- [19] 李亚男.安防机器人视觉道路识别及轨迹跟踪控制研究[D].山东大学,2022.
- [20] 刘明春.基于深度学习的变电站巡检机器人道路场景识别[D].西南交通大学,2019.

- [21] 田成富.四舵轮物流机器人路径纠偏算法研究及控制系统设计[D].北京化工大学,2020.
- [22] Directional Stability of Automatically Steered Bodies[J]. 1922.
- [23] Ziegler J G N N B. Process Lags in Automatic Control Circuits[J]. 1943.
- [24] Åström K J H T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning[M]. 1995.
- [25] Lee S, Burm J. A DC-DC buck converter with using a Digital PID regulator Based on a simple control algorithm: International Symposium on Signals[C], 2011.
- [26] Tieying J, Jie L, Kewei H. Longitudinal parameter identification of a small unmanned aerial vehicle based on modified particle swarm optimization[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015,28(3): 865-873.
- [27] 吴毅,夏婷婷,李润青.基于 NB-IoT 及 LORA 的技术分析和应用展望[J].中国管理信息化,2018,21(03):162-164.
- [28] Gao J, Hu Y .Direct Self-Control for BLDC Motor Drives Based on Three-Dimensional Coordinate System[J]. IEEE Trans. Industrial Electronics, 2010, 57(8):2836-2844.
- [29] 刘明浩.基于 DSP 的无刷直流电动机驱动器的研制[D].哈尔滨工业大学,2006.
- [30] 崔家文.光伏发电系统性能及可靠性评估[D].华北电力大学(北京),2016.
- [31] 邓乾中.自校准实时时钟 RTC 的研究和设计[D].华中科技大学,2008.
- [32] 刘冬生,陈宝林.磷酸铁锂电池特性的研究[J].河南科技学院学报(自然科学版),2012,40(01):65-68.
- [33] 吕文涛.LoRa 网络中 ALOHA 防碰撞算法及数据安全的研究[D].重庆理工大学,2018.
- [34] Anonymous. Bluetooth SIG Commences Qualification Program for Bluetooth Core Specification Version 4.0[J]. Manufacturing Close - Up, 2010.
- [35] 曹雪君,姚娜,王天秀等.时序数据库在航天型号试验数据管理中的应用[J].航天控制,2024,42(01): 51-57.
- [36] 倪峰,金海峰,苏春芳. Docker 与 ChirpStack 在 LoRaWan 云服务中的应用研究[J].现代信息科技,2022,6(11):19-21+26.
- [37] 丘杰雄.Nginx+Keepalived+Tomcat+MySQL 高可用负载均衡 Web 应用架构实践[J].金融科技时代,2019(11): 38-42.
- [38] 徐小辉,刘江涛,高涵等.基于 SpringBoot+Vue 框架的采气方案系统开发[J].计算机仿真,2021,38(06): 248-250+382.
- [39] 滕毅,马焯文.基于 Uniapp 的校园拼车多端小程序设计与实现[J].电子制作,2022,30(16): 43-46.
- [40] 黄显达,黄立军,刘以清.一种光伏机器人的路径纠偏系统及光伏机器人[P]. 福建省: CN117401032A,2024-01-16.
- [41] 蔡高芳,丁晓林.一种光伏清扫机器人防卡死纠偏机构及光伏清扫机器人[P]. 江苏省: CN116586394A,2023-08-15.

- [42] 张文超, 王建东, 宋鋐, 等. 光伏清洁机器人的偏移纠正方法、装置、计算机设备及可读存储介质[P]. 浙江省: CN115755883A, 2023-03-07.
- [43] 张复厚. 一种防偏移光伏板清洁机器人[P]. 安徽省: CN117382760A, 2024-01-12.
- [44] 于涛, 孙欣, 白亮亮. 光伏清洗机器人的自动纠偏方法、纠偏系统及清洗机器人[P]. 浙江省: CN115268442A, 2022-11-01.
- [45] 任宇霄, 孙凯, 全鹏, 等. 光伏悬挂式清扫机器人位姿调整方法、装置和电子设备[P]. 江苏省: CN117415811A, 2024-01-19.
- [46] 李峰, 冯雪峰, 贾广成, 等. 一种用于光伏清扫机器人的偏差检测装置[P]. 新疆维吾尔自治区: CN117168280A, 2023-12-05.
- [47] 王成. 光伏电站行走清洗机器人行驶偏离判定装置及修正方法[P]. 上海市: CN110398973A, 2019-11-01.
- [48] 朱立春, 赵为, 朱家朋, 等. 光伏板清扫机器人及其偏斜检测和纠偏方法[P]. 安徽省: CN109382384B, 2020-05-22.
- [49] 李飞, 周白玉, 杨玉洁, 等. 一种光伏清洁机器人的双轴姿态矫正装置及态矫判断方法[P]. 安徽省: CN116048134A, 2023-05-02.
- [50] 张磊, 张佳, 王磊, 等. 光伏组件清扫机器人纠偏系统[P]. 安徽省: CN217411829U, 2022-09-13.
- [51] 彭伟, 肖雅萍, 王世飞等. 基于九轴传感器的人体异常行为检测[J]. 现代计算机, 2019, (30): 83-87.
- [52] 光电传感与检测技术[M]. 江晓军, 主编. 机械工业出版社. 2011.
- [53] 孙建民, 刘祥, 赵国浩等. 模糊反馈增量式比例积分微分油气悬架控制[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(34): 14814-14820.
- [54] 汲万政. 基于 PID 的轨道车辆半主动控制策略与优化[D]. 大连交通大学, 2023.
- [55] Ang H K, Chong G, 0002 L Y. PID control system analysis, design, and technology[J]. IEEE Trans. Contr. Sys. Techn, 2005, 13(4): 559-576.
- [56] Yang J, Li B, Zhuang Z. Research of Quantum Genetic Algorithm and its application in blind source separation[J]. Journal of Electronics (China), 2003, 20(1): 62-68.
- [57] 孙晓明. 量子计算若干前沿问题综述[J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(08): 982-1002.
- [58] 王功亮, 王好臣, 李振雨等. 基于优化遗传算法的移动机器人路径规划[J]. 机床与液压, 2019, 47(03): 37-40+100.
- [59] 刘定理. 遗传算法综述[J]. 中国西部科技, 2009, 8(25): 41-43.
- [60] 郭红霞, 王政瀛. 基于脉冲频率调制技术在直流电机调速控制系统中的研究[J]. 南方农机, 2021, 52(12): 115-117.
- [61] 陈智昕. 一种驱动三相马达的集成电路设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [62] 周子馨. 单相无刷直流电机无传感器控制系统[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.

- [63]刘艳菊.可控励磁电源中的 DC/DC 变换混沌现象分析及同步控制研究[D].东北大学,2014.
- [64]范方方.无位置传感器的直流无刷电机控制系统研究[D].中国海洋大学,2016.
- [65]王越涛.基于 FPGA 的遥测数据存储器设计与实现[D].中北大学,2023.
- [66]童法涛.高性能小型化微波滤波器的设计与研究[D].桂林电子科技大学,2023.
- [67]杨辉.巴特沃斯低通滤波器的设计与仿真分析[J].电子产品世界,2022,29(12): 79-81.
- [68]Li W, Wu H, Zhu N, et al. Prediction of dissolved oxygen in a fishery pond based on gated recurrent unit (GRU)[J]. Information Processing in Agriculture, 2020.
- [69]Cho K, Merrienboer V B, Bahdanau D, et al. On the Properties of Neural Machine Translation: Encoder-Decoder Approaches[J]. CoRR,2014,abs/1409. 1259.
- [70]Kozhambergen Z, Khizirova M. The advantage of the wavelet transform in the processing of speech signals[J]. Scientific Collection«InterConf»,2023(144): 483-488.
- [71]Khan ,K. S A M ,Rahman , et al. Implementation of Wavelet-Based Controller for Battery Storage System of Hybrid Electric Vehicles [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47 (5): 2241-2249.
- [72]Christoph S ,Gregor M ,E A G . Analysis of Complex Circadian Time Series Data Using Wavelets. [J]. Methods in molecular biology (Clifton, N.J.), 2022, 2482 35-54.

附录

作者在读期间发表的学术论文、专利及参加的竞赛和科研项目

申请专利：

[1] 陈科明，雷宇素，曾佳，孔秀婷.基于电机电流数据分析的轨道式光伏清洁机器人位置检测方法[P].浙江省：2024100117983,2024-01-24.

科研项目：

- [1] 光伏清洁机器人，横向课题
- [2] 物联网传感器研发、运维及数据解析升级项目.浙江省科技项目管理服务中心（ZJXL-KJXX-202101）.2021.10-2023.10