

杭州电子科技大学

硕士学位论文

题目：智能光伏清洁机器人控制系统设计

研究生 庞若雷

专业 电子信息

指导教师 陈科明 副教授

企业导师 曾佳

完成日期 2023 年 5 月

杭州电子科技大学硕士学位论文

智能光伏清洁机器人控制系统设计

研 究 生： 庞若雷

指导教师： 陈科明 副教授

2023 年 5 月

**Dissertation Submitted to Hangzhou Dianzi University
for the Degree of Master**

Design of control system for intelligent photovoltaic cleaning robot

Candidate: Pang Ruolei

Supervisor: Associate Prof. Chen Keming

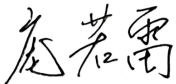
May, 2023

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

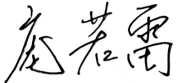
本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

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：  日期： 2023 年 5 月 31 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：  日期： 2023 年 5 月 31 日

指导教师签名：  日期： 2023 年 5 月 31 日

摘 要

随着光伏电站的大规模部署，光伏清洁机器人正在逐步替代人工清洁。目前，集中式光伏电站主要采用轨道式光伏清洁机器人进行清洁工作，但其依然存在着一些不足之处：对光伏清洁机器人缺乏有效的远程监控手段；机器人在清扫过程中上下电机容易发生错位，导致自锁；系统在数据传输过程中易丢数据、效率低、流量损耗高等问题。

本文针对光伏清洁机器人现有的问题，设计了一套智能光伏清洁机器人控制系统。该系统结合嵌入式设备，云平台，前后端，微服务等一系列技术，实现了智能清洁，远程监控，故障报警，远程更新等功能。

针对轨道式光伏清洁机器人的双电机在清扫过程中容易发生错位，导致机器人自锁，甚至卡死在轨道上的问题，本文设计了一种基于模糊控制（Fuzzy Control, FC）器的双电机同步控制方法。内容包括：建立了上下电机的行走模型，根据控制需求设计基于位差模糊控制器的同步控制策略；并设计了无接触式角度传感器来检测上下电机的位移差。本文首先通过仿真证明了控制器设计的可行性，然后通过实际测试进行验证。结果表明在电机运行过程中，上下电机偏移到最大位移差后，恢复到平稳运行状态平均只需 1.20 秒。最后，统计电站一个月内的行走位差故障数据，发现本文设计的机器人行走位差故障率相比第一代大幅减少，证明了该方法的有效性。

为了提高系统的安全性、效率性、减少数据传输过程中不必要的流量损耗，本文着重对处于感知层和传输层的光伏清洁机器人物联网数据传输策略进行设计。针对各个层次数据交互的特点，本文设计了参数监控点连读、数据主动批量上报、数据断网续传和断点续传的远程升级等策略。结果表明，本文设计的数据传输策略，能使设备保存至少 12 分钟的离线数据，并重新上传；断点续传的远程更新方式在网络情况较差时，更新文件下载的成功率达到了 100%；系统的数据流量大幅减少，相比传统的透传模式流量减少了 86.8%；最后，本文进行了长期的稳定性测试，系统运行正常，证明了该设计的有效性。

关键词：光伏清洁、物联网、电机同步、数据传输

ABSTRACT

With the large-scale deployment of photovoltaic power plants, photovoltaic cleaning robots are gradually replacing manual cleaning. At present, centralized photovoltaic power plants mainly use track-type photovoltaic cleaning robots for cleaning work, but there are still some shortcomings: there is a lack of effective remote monitoring methods for photovoltaic cleaning robots; During the cleaning process of the robot, the upper and lower motors are prone to misalignment, leading to self-locking; The system is prone to data loss, low efficiency, and high traffic loss during data transmission.

This thesis focuses on the existing problems of photovoltaic cleaning robots and designs an intelligent photovoltaic cleaning robot control system. This system combines technologies such as embedded devices, cloud platforms, front-end and back-end, and microservices to achieve intelligent cleaning, remote monitoring, fault alarm, and remote update functions.

This thesis proposes a dual motor synchronous control method based on Fuzzy Control (FC) to address the misalignment of the dual motors of the track-mounted photovoltaic cleaning robot during the cleaning process, which can lead to the robot self-locking or even getting stuck on the track. The content includes: establishing a walking model of the upper and lower motors and designing a synchronous control strategy based on a position difference fuzzy controller according to control requirements; a non-contact angle sensor was designed to detect the displacement difference between the upper and lower motors. This thesis first proves the controller design's feasibility through simulation, then verifies it through actual testing. The results indicate that during the operation of the motor, it only took 1.20 seconds for the upper and lower motors to shift to the maximum displacement difference and return to a stable operating state. Finally, based on the statistics of the power plant's walking position difference fault data within one month, it was found that the walking position difference fault rate of the robot designed in this thesis was significantly reduced compared to the first generation, proving the effectiveness of this method.

To improve the security and efficiency of the system and reduce unnecessary traffic loss during data transmission, this thesis focuses on designing a data transmission strategy for photovoltaic cleaning machines in the perception and transmission layers. Based on the characteristics of data interaction at various levels, this thesis designs strategies such as parameter monitoring point connection, active batch data reporting, remote upgrade of data disconnection and breakpoint continuation. The results show that the data transmission strategy designed in this thesis can enable

the device to save at least 12 minutes of offline data and reupload it; The remote update method of breakpoint continuation achieves a success rate of 100% in downloading update files when the network situation is poor; The data traffic of the system has significantly decreased, reducing by 86.8% compared to the traditional transparent transmission mode; Finally, this thesis conducted long-term stability testing and the system ran normally, proving the effectiveness of the design.

Keywords: PV cleaning, Internet of Things, Motor synchronization, Data transmission

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 国内外发展现状.....	2
1.2.1 光伏清洁机器人的发展现状.....	2
1.2.2 双电机同步的发展现状.....	4
1.2.3 物理网数据传输的发展现状.....	5
1.3 本文主要研究的内容及章节安排.....	6
第 2 章 智能光伏清洁机器人控制系统的总体设计.....	7
2.1 系统总体设计.....	7
2.1.1 需求分析.....	7
2.1.2 总体框架.....	8
2.2 嵌入式硬件设计.....	9
2.2.1 电控模块硬件设计.....	9
2.2.2 通信模块硬件设计.....	10
2.3 嵌入式软件设计.....	11
2.3.1 电控模块软件设计.....	11
2.3.2 通信模块软件整体设计.....	12
2.3.3 通信协议设计.....	13
2.3.4 数据处理流程.....	15
2.4 应用软件设计.....	16
2.4.1 云平台设计.....	16
2.4.2 Web 端设计.....	18
2.4.3 小程序设计.....	18
2.5 系统效果展示.....	19
2.5.1 设备部分效果展示.....	19
2.5.2 Web 端部分效果展示.....	19
2.5.3 小程序部分效果展示.....	23

2.6 本章小结.....	23
第 3 章 基于模糊控制器的双电机同步控制系统设计.....	24
3.1 双电机同步系统的问题分析.....	24
3.2 基于模糊控制器的双电机同步控制策略设计.....	25
3.2.1 电机控制系统的建模设计.....	25
3.2.2 交叉耦合同步控制策略的设计及验证.....	28
3.2.3 基于模糊控制器的交叉耦合同步控制策略改进.....	34
3.3 用于同步控制的无接触式角度传感器设计.....	39
3.3.1 无接触式角度传感器的硬件设计.....	39
3.3.2 无接触式角度传感器在光伏清洁机器人中的应用.....	40
3.4 总体系统测试.....	42
3.5 本章小结.....	43
第 4 章 智能光伏清洁机器人物联网数据传输策略的设计.....	45
4.1 数据传输的问题分析.....	45
4.2 基于参数监控点的感知层数据传输设计.....	46
4.2.1 参数监控点的设计.....	46
4.2.2 参数监控点的连读策略设计.....	47
4.3 基于批量上报和断网续传的传输层数据传输设计.....	49
4.3.1 数据主动批量上报策略设计.....	49
4.3.2 数据断网续传策略设计.....	50
4.3.3 基于断点续传的远程升级策略设计.....	54
4.4 基于消息队列的平台层与应用层数据传输设计.....	56
4.5 实验测试与结果分析.....	57
4.5.1 数据离线续传性能测试.....	57
4.5.2 远程更新性能测试.....	59
4.5.3 数据传输流量测试.....	61
4.5.4 稳定性测试.....	62
4.6 本章小结.....	63
第 5 章 总结与展望.....	64
5.1 总结.....	64
5.2 展望.....	65
致谢.....	66
参考文献.....	67
附 录.....	72

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

在二十大报告上习近平总书记指出，深入推进能源革命，加快规划建设新型能源体系。目前，我国的电力能源主要依赖煤矿、重油和天然气等不可再生资源，占比高达 70%^[1]，但是利用这种不可再生的化石资源主要有以下缺点：其一，化石燃料难以再生^[2]，且在我国资源分布相对较少，大部分来源于国外进口^[3]；其二，导致温室效应的原因之一就是对化石燃料的过度使用^[4]，这与我国节能减排的政策相左。因此大力开发太阳能有利于优化我国的能源结构。根据国家能源局官网所展示的数据，截至 2021 年底，我国新增光伏发电并网装机容量约 5300 万千瓦 光伏发电并网装机容量达到 3.06 亿千瓦，占全国总发电装机容量的 12.9%^[5]。

2016-2021年中国光伏发电装机容量统计

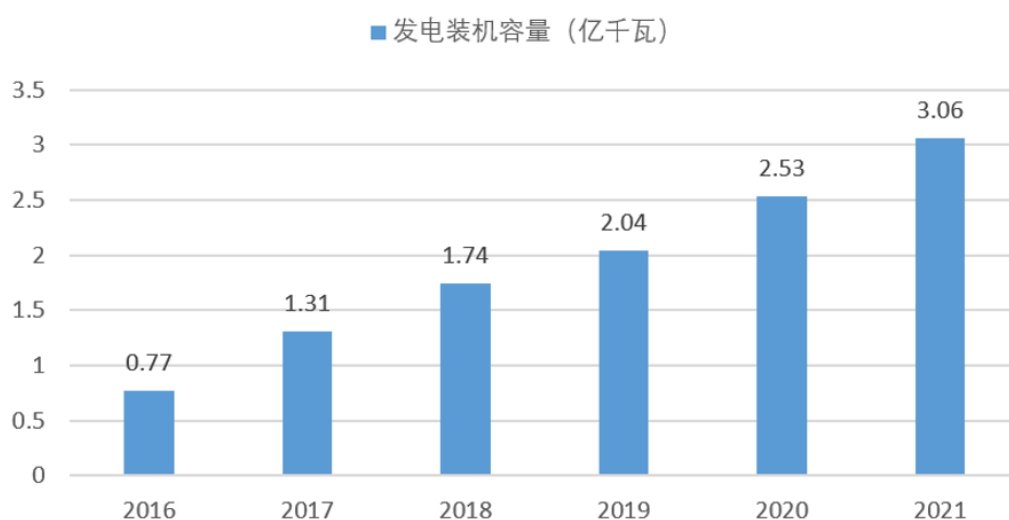


图 1.1 2016 年至 2021 年中国光伏装机总量数据统计

光伏组件是将太阳能转变为电能的关键一环，其将太阳能转化为电能的效率直接影响着整个光伏系统的效益^[6]。影响光伏组件能量转换效率的因素包括太阳光辐射、安装时倾斜角度、使用的材料之外，另一个不可忽视的因素是有无对光伏组件遮挡，包括灰尘、积雪、杂草等。目前，大规模的光伏电站一般部署于荒无人烟的野外，在长时间没有受到清洗的情况下，空气中大量的灰尘会随着时间在光伏组件表面堆积，严重降低了光伏组件的能量转换效率，发电量大幅减少，进而影响到整个光伏系统的发电效率和经济效益^[7-10]。

根据相关学者的研究，光伏组件的能量转换效率受到灰尘量的影响较大^[11-12]。由光伏组件的发电效率在不同灰尘量下的对比实验可得，当光伏组件上的灰尘量达到 $5\text{g}/\text{m}^2$ 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 $15\text{g}/\text{m}^2$ 时，其发电效率为无灰尘时的 79%。

由此可见，灰尘在光伏组件表面上堆积时会严重影响其对太阳能的转化，当灰尘量增多时会影响光伏组件的发电效率，降低电能的产生。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，同时会造成光伏组件产生不必要的热量^[13-14]，导致热斑效应的产生^[15-16]，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^[17-20]。因此，定期清理光伏组件，减少灰尘杂物对光伏组件的遮蔽，确保光伏组件对太阳辐射有较高的透过率，对于增加光伏组件的发电效率，降低光伏组件的故障率具有重大意义^[21-22]。

当下对光伏组件的主要清洁方式有以下几种：

（1）人工清洗：目前，许多地区的光伏电站依然以人工清洁的方式对光伏板进行清洁工作^[23-24]。其在人力、水源等方面开销较大，提高了维持光伏电站日常运维的成本^[25]。

（2）光伏清洗车：工作人员通过控制大型车载上相应的清洁工具进行清洗^[26]。虽然减少了人员数量，但还是需要由人去操控，提升了成本。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。

（3）轨道式清洁机器人：安装在光伏板轨道上，工作时机器人沿着轨道运行，开展清洁工作^[27]。安装成本较大，只适用于大规模集中式光伏电站中，并且缺少相应的监控手段，出现故障时不能及时通知处理。

（4）便携式光伏清洁机器人：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^[28]。由于其轻便小巧的特点，大多运用于分布式光伏板的清洗过程中。在面对大规模集中式的光伏阵列时，效率较低，且需要工作人员来回搬运机器人。

综上所述，目前对大规模集中式的光伏阵列进行清洁还有较多问题存在。为此研究一种智能光伏清洁机器人，使它具有智能清洁，稳定运行，远程监控，故障报警，远程更新的功能，具有重大意义。

1.2 国内外发展现状

1.2.1 光伏清洁机器人的发展现状

由于光伏积灰问题成为了制约光伏项目进一步发展的重要因素，而人力清洗的成本高昂，因此国内外众多公司对光伏清洁机器人的开发进行了深入研究，主要分为：光伏清洗车，单排式、跨排式和便携式清洁机器人。

（1）光伏清洗车

赵波等人发明了移动式光伏板积灰干式清洁装置^[29]，如图 1.2 所示，并进行了实地测试。测试结果说明，在吉林省西部的某光伏电站，对累积 7~14 天灰尘的光伏板阵列进行清洗后，整体发电功率提高了 2.87%~7.85%，并节省了大量的清洗费用。



图 1.2 光伏清洗车

这种光伏清洗车的体积过大，在安装光伏板时，还需留出较大的距离给清洗车通过，大大的降低了光伏板的安装密度。并且，每 100MW 的光伏电站就需要安装一套设备，单位容量、单次清洗费用为 0.0028 万元/MV，使用成本较大。

（2）单排、跨排光伏清洁机器人

单排、跨排光伏清洁机器人主要适用于大规模集中式光伏电站的积灰清除工作。单排光伏清洁机器人运行在固定光伏板的上下两侧支架上，无需建造多余的运行轨道。主要运用于大型集中式光伏电站，绍兴舜海公司生产的该类型机器人，单次最多可以运行 2000m，持续运行 2 小时。

跨排式光伏清洁机器人相较于单排式清洁机器人，多了地面轨道以及地面搬运装置。它可以在清洗完一条光伏板后，返回原点，通过搬运装置移向后一排光伏板进行清洁。这样的操作方式减少了清洁机器人的安装数量，有效的降低了企业成本。



图 1.3 单排式光伏清洁机器人



图 1.4 跨排式光伏清洁机器人

Hammoud^[30]等人设计了一种单排式清洁机器人，并在黎巴嫩的某座光伏电站进行了性能测试。测试结果说明，与同一时间内没有进行清洁活动的光伏板阵列的总发电量相比，清洗后光伏组件的发电效果平均提高 32.27%，有效的提高了光伏组件对太阳能的利用率。

谷玉之^[31]等人设计了一种多排式光伏清洁机器人，当一排光伏板清扫完成后，由摆渡车搭载清扫小车运载至未清洗的光伏板上。测试结果显示，连续运行 30 天，系统依旧十分稳定。

（3）便携式光伏清洁机器人

便携式光伏清洁机器人能直接在光伏板上运行，是解决分布式光伏板清洁工作的主要手段。其主要工作形式是以小型机器人为主，在光伏板上按照规划好的路径运行，进行清洁工作。其最大的特点是灵活高效，不需要复杂的安装过程，可直接在不同的光伏板之间进行移动。但它最大的问题是在倾斜度较高的场景下，有掉下来的可能性^[32]。



图 1.5 便携式光伏清洁机器人

Antonelli^[33]等人研发的一种便携式的光伏组件清洁机器人，通过履带式运行方法，并在机器人的滚刷进行转动清洁时，通过喷水来加强光伏板的清洁能力。测试结果说明，该机器人具有较高的清洗能力和工作效率。MiraiKikail cleaning robot^[34]针对的是在倾斜度较小的光伏板清洁工作，而且需要手动遥控，自动化清洁能力差。

综上所述，虽然光伏清洁机器人多种多样，每一种都有其适合的具体应用场景，但是他们都存在着一定问题。光伏清洁机器人的智能化程度不够高，清洁工作还过度依赖人的参与，无法根据诸如天气等情况进行自主清洁，并且机器人没有连接加入互联网，缺少有效的数据采集分析和监控手段，没有后续远程更新的能力等。

1.2.2 双电机同步的发展现状

目前虽然轨道式清洁机器人已有大量的公司进行研发，也已部署到了相关光伏电站中，但它所面临的最大问题是行走系统对光伏板的安装较为严苛，如果光伏板有铺设不平、轨道上有障碍物的等的情况，将会导致光伏清洁机器人的上下行走电机行走不协调而导致错位，自锁现象发生。为此众多厂家对这个问题进行了积极探索。上海安轩使用了履带代替轮式结构，但是上、下履带的协调性还有待提升；南京天创进行了对光伏组件重新安装尝试，但其成本太高，无法得到推广；中电博顺使用了单轮单控的技术，提高了机器人的越障能力，自锁现象出现频率大大降低，但性价比较低^[35]。本文设计的第一代光伏清洁机器人在实地部署运行过程中也收到了大量关于上下电机行走位差的故障警报。

为了使双电机能同步运行，业界一般有两种方法：机械同步和电同步。机械同步控制方式是十分简单，因此在实际工业控制中拥有广泛应用。其主要是利用机械轴的传动控制电动机，之后用一些诸如皮带、齿轮等机械结构来进行同步^[36]。但机械同步的控制方式会产生抖动、噪音等现象，并且倘若系统中电机相隔较远，则传动装置也需要扩大相应的体积，这将

会导致偏差的增大。所以，在要求较为苛刻的应用场合，机械同步控制无法得到较好的效果。鉴于机械同步控制方式的缺点，电同步控制方式得到了人们的重视。

电同步控制与机械同步最大的区别在于不需要额外的机械结构连接，只需要通过软件实现同步控制算法，就可以实现电机的同步。双电机同步控制又可以分为非耦合、耦合结构^[37]。其中，并行结构、主从结构为常见的非耦合结构，也就是说两电机之间没有耦合关系，通过设定一样的速度，各自调节自身的速度达到设定速度，实现同步效果^[38-39]。但他的缺点是同步精度极易受到外界因素干扰；耦合结构是指电机之间有一定联系，会相互影响。当单台电机受到干扰时会引起整个控制系统做出响应。典型的耦合结构有交叉耦合结构^[40]、虚拟主轴结构^[41]等。虽然耦合结构相比非耦合结构略微复杂，但在系统受到干扰时能仍具有良好的同步性能。

如何搭建合适的结构，选择合适的电机同步控制算法，以提高驱动轮的同步率，减少运行中故障的产生是本文研究的重点。

1.2.3 物理网数据传输的发展现状

近年来，随着无线通信、云计算、大数据分析等技术的快速发展，物联网技术已广泛运用于各行各业，在我们的生活中随处可见。物联网是指使用各种传感器采集，比如电压、电流、温度等信息，通过通信模块与互联网相连接，进行信息交换，最后通过计算机软硬件和大数据分析技术等，实现对设备的智能化识别、监控、管理、分析等功能^[42-44]。物联网的四层架构分别是感知层、传输层、平台层和应用层，感知层与传输层的设备又可以统称为边缘设备。

随着物联网技术的不断发展，设备的种类和数量不断增加，需要监控的数据参数越来越多，越来越复杂^[45]。这对整个物联网系统中，数据获取和分析的及时性、数据传输的可靠性，数据存储的能力都提出了较高的要求^[46]。

通过云平台^[47]和应用层的服务器可以存放和管理大量数据。它们具有服务高效和价格低廉等特点，能够很好的满足用户的需求^[48]，但是在面对海量数据需要处理的情况下，有时也显得力不从心。边缘设备，作为与直接云平台对接的部分，通过其对数据进行相应计算处理后，有选择的上传至云平台，可以极大提升整个系统的性能。边缘设备在靠近具体设备的一边实现相关数据的存储、处理、计算等功能，在减少网络带宽浪费的同时，也可以为用户提供更快的响应^[49-50]，提高系统的实时性和数据传输过程中的安全性、可靠性^[51-52]。

Boualouache^[53]等人设计了一种基于低功耗蓝牙技术的物联网数据采集系统，通过蓝牙技术将数据从传感器收集后发送给网关，再由网关将数据转发到互连网络中。邹萍^[54]等人总结了传输层的网关设备可以支持的数据通信方式及协议：总线协议、远程操作协议、端口通信协议、无线通讯协议、数据传输协议等通信协议。张晓天^[55]等提出基于优先级的最优排序采集调度方法，根据多跳无线网络数据采集结构优化数据包大小和频谱感知次数，并以监测类

型作为优先级进行最优排序，有效地提高了数据采集调度的效率，满足了系统的时延要求。Al-Turjman^[56]等人提出的调度和路由方法能够为大数据应用提高传输速度，该方法在数据大小、预期时延、链路负载和链路容量等方面考虑了源端和目的端的需求。

如何行之有效的对需要通信的数据进行管理、传输，以提高整个系统运行的高效性和稳定性，是本文研究的重点。

1.3 本文主要研究的内容及章节安排

本文分析了传统光伏清洁机器人的不足之处，通过对嵌入式设备，云平台，前后端，微服务等一系列先进技术的运用，设计了一套智能光伏清洁机器人控制系统。为光伏电站提供了智能清洁，远程监控，故障报警，远程更新等多项功能。本章的内容安排如下：

第一章：绪论，介绍了光伏产业在我国的发展潜力巨大，但是清洁问题成为了制约光伏产业发展的首要因素。之后对现有的光伏清洁机器人进行研究分析，找到可以借鉴的地方并总结他们的不足。然后，针对轨道光伏清洁机器人经常出现上下电机错位现象进行分析，对双电机的同步控制进行研究，分析不同的双电机同步策略的优劣。最后对物联网数据的传输现状进行了研究，明确了光伏清洁机器人这一边缘设备在整个系统的数据传输过程中起着重要的作用。

第二章：介绍了智能光伏清洁机器人控制系统的整体设计。首先对系统的总体设计进行了说明；再对系统的各个部分进行介绍，包括设备总体结构，硬件、软件部分、相关协议、应用层软件的设计；最后对实物进行详细展示。

第三章：介绍了基于模糊控制器的双电机协同控制系统设计。首先阐述了轨道式光伏清洁机器人在运行时遇到的上下轮错位从而导致自锁的问题。通过分析直流电机以及相应的运动控制算法，建立了上下电机的运行模型用以比较各个算法的优劣，并设计了行走位移差模糊控制器来优化控制效果，最后使用线性霍尔传感器设计了无接触式角度传感器来反映上下电机的偏移差距。测试表明，该方法极大的提升了系统的稳定性，降低了故障的发生率。

第四章：对光伏清洁机器人控制系统的数据传输过程进行了设计。首先对传统物联网设备在数据传输过程中存在着的问题进行分析，并针对本项目的特点，着重对感知层和传输层的边缘设备进行优化设计。通过参数监控点连读、数据主动批量上报、数据断网续传、断点续传的远程升级等策略对系统进行改进。测试表明，本文所设计的系统在数据传输过程中具有较高的稳定性，效率性和安全性。

第五章：对智能光伏清洁机器人控制系统设计进行总结，提出了目前系统存在的一些不足和可以改进的地方，并指出后续进一步研究的方向。

第2章 智能光伏清洁机器人控制系统的总体设计

针对前文分析的传统光伏清洁机器人存在的问题，本文设计了智能光伏清洁机器人控制系统。系统包括光伏清洁机器人，云平台，算法平台，微信小程序和 Web 客户端，以实现智能清洁，故障报警，数据可视化，远程运维等功能。通过拥有 Cat.1 模组的通信模块和光伏清洁机器人的电控模块进行数据交互，实时向 OneNET 物联网云平台上报光伏清洁机器人运行过程中的重要参数。当平台对参数进行处理，整合和分析之后，将实时数据及相关的各种信息通过 Web 端和微信小程序的方式进行多样的展示，便于电站的工作人员进行远程管理和控制。

2.1 系统总体设计

2.1.1 需求分析

根据当前光伏清洁机器人系统中存在的不足之处，对于要设计的光伏清洁机器人控制系统，主要需求有以下部分：

(1) 节省人力，改变传统人工清洁费时费力的情况。在安装完该系统后，可定时自行清洁也可以通过光伏电站的视频监控由工作人员判断是否需要清洁。只需要一个操作员就可以控制光伏清洁机器人相关操作，无需额外的人员介入。

(2) 智能化清扫，具有定时清扫，根据天气情况判断是否开启清扫等功能。并在清洁机器人滚刷附近安装灰尘传感器，通过对清扫时所扬起的灰尘量，判断清扫工作是否需要继续进行，深化清洁程度。

(3) 运行稳定，通过特定的机械结构设计和双电机协同控制算法，以达到运行稳定的效果，提升机器人在轨道上运行的鲁棒性。

(4) 优化数据传输，针对本系统的数据传输过程的特点，考虑监控参数管理，通信模块离线，节省流量使用，提高数据实时性等情况，设计数据传输策略，以到达提高系统的安全性、效率性、减少数据传输过程中流量损耗这一目的。

(5) 实时监测，通过基于 Cat.1 模组的通信模块，可以实时获取光伏清洁机器人的状态，例如启停状态、运行速度，电机运行位差、电池电量、温度等信息。还可以查询一个地区部署了多少设备，运行情况的历史记录，历史故障报警等信息，并加以分析。所有信息都可以及时的可视化的展现在运维人员面前。

(6) 远程控制，操作人员可以通过微信小程序或者 Web 端进行远程控制光伏清洁机器人。控制的功能可以是修改单台机器人的相关参数，也可以自行将设备按地区，电站等分类进行批量修改。控制的参数有启动，停止，复位，定时及清扫次数等，还可以设置电机运行

速率，滚轴旋转速率，保护电量等设置。

(7) 数据可视化分析，可以选取相应的数据，以图表化的形式展现，更加形象直观。例如，将所有部署本系统的电站标注在地图上进行展示，故障信息以饼状图的形式呈现，更直观的了解不同故障的发生频率。

2.1.2 总体框架

根据上述对需求的分析，对光伏清洁机器人系统进行整体设计，系统总体设计图如图 2.1 所示。

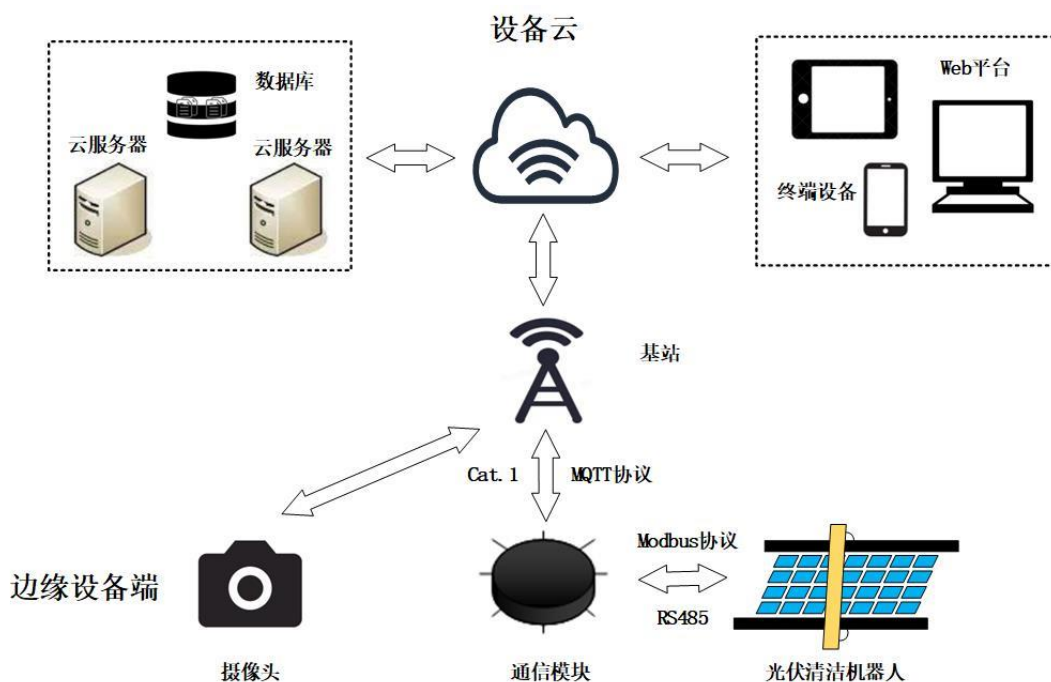


图 2.1 光伏清洁机器人系统架构图

系统整体框架主要分为边缘设备端，云平台和应用端。系统的边缘设备端包含了光伏清洁机器人电控部分，通信模块和摄像头。光伏清洁机器人的电控模块和通信模块通过 RS485 进行数据通信，摄像头直接将光伏电站视频信息实时上传。云平台是连接边缘设备端和应用端数据交互的中间桥梁，通过 MQTT 协议进行通信，主要承担数据存储、管理和分析等功能。应用端是 Web 端和终端设备，既可以将采集上来的数据信息直观的展示给运维人员，也可以直接对边缘设备端的设备下发命令，进行控制。

(1) 边缘设备端：光伏清洁机器人电控模块采用的是 GD32F103RCT6 芯片进行控制，是完成清扫这一基本功能的主体。通信模块与电控模块使用 RS485 接口进行数据交互，采用 Modbus 协议作为通信协议。通信模块首先对采集到的机器人数据进行相应的处理，之后通过使用 Cat.1 无线通信技术将数据传输至云平台。云平台和通信模块之间使用 MQTT 协议进行通信，以确保数据收发的稳定性。摄像头采用的是海康公司生产的具有 4G 联网功能的监控摄像头。

(2) 云平台：从具体业务功能方面划分为设备云和业务云。设备云使用的是移动公司开发的 OneNET 云平台，主要负责与通信模块进行对接，对上传的光伏清洁机器人的相关参数进行显示和存储。业务云主要功能是对具体的业务逻辑进行管理，通过 OneNET 云平台提供的接口获取相应的数据信息，同时还提供了相应的 API 接口让客户端可以方便的调用这些参数数据。

(3) 应用端：依托于 Web 端和微信小程序的功能，将光伏清洁机器人的相关参数数据进行可视化展示，包括运行速度，电池电压等数据，设备管理功能和故障报警信息等，并向运维人员提供远程监视，远程控制，远程更新等功能。

2.2 嵌入式硬件设计

2.2.1 电控模块硬件设计

电控模块硬件设计功能展示如图 2.2 所示，主要由限位传感器模块、灰尘检测传感器模块、RS485 模块、红外模块、MCU 模块和电源管理等模块构成。

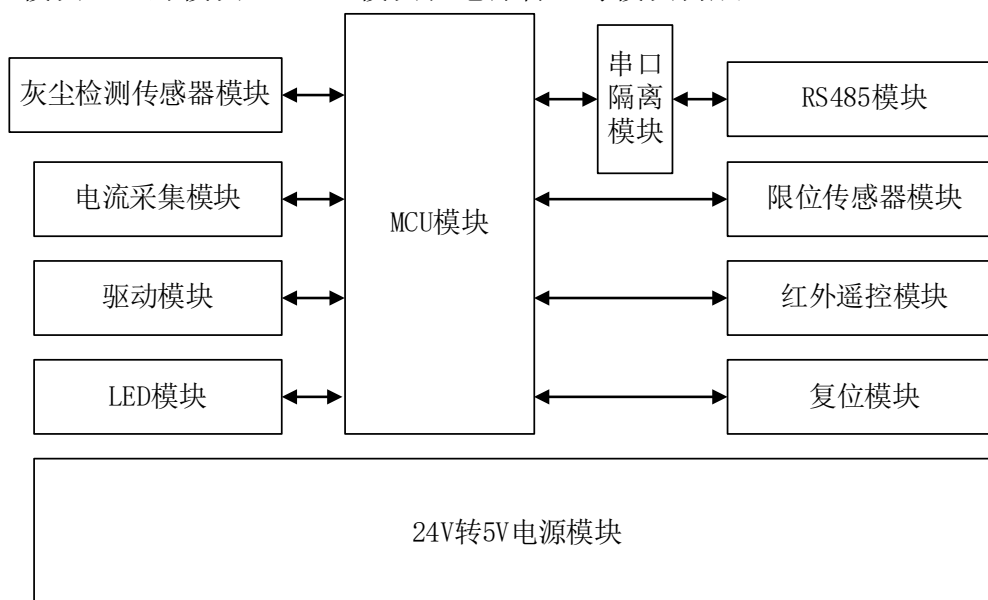


图 2.2 电控模块硬件功能总体框图

MCU 模块：使用的是 GD32F103RCT6，这款芯片功能强大，不仅拥有具有较多的片上资源，能与方便的管理各个模块，而且 Flash 具有较大的容量，能很好的存储设备的关键信息和远程更新的代码。

RS485 模块：此模块主要与通信模块的设备相连，进行数据交换。对于复杂的野外环境，需要考虑提升抗干扰的能力，为此加入光耦隔离部分，以增强数据传输的稳定性。

限位传感器模块：限位传感器使用的是 NJK-5002C。它运用了霍尔原理，当传感器接近磁铁时，导体中的电子会受到磁场给予的垂直于运动方向上的力，使得导体在其表面产生电势差，导致传感器输出高低电平。单片机引脚捕获电平变化后，根据逻辑判断做出停止或返回的判断。

红外遥控模块：使用者可以通过遥控器对光伏清洁机器人进行远程遥控，用以设备的初始化，控制前进，后退停止等指令。

灰尘监测模块：灰尘监测模块主要采用的是 GP2Y1014AU 模块，其主要监测空气中的灰尘数量。在光伏清洁机器人运行的过程中进行灰尘检测。一个清扫过程是来回清洁光伏板一次。当机器人从光伏轨道的开端运行到结束端，遇到限位开关后，电机器人反向运行，并对装在清扫刷子后的灰尘传感器的数据进行分析，倘若检测到的刷子所扬起的灰尘量超过设定值时，则说明第一次的清扫不彻底，还需再进行一次清扫。

LED 指示灯模块：指示灯一共有三个，分别表示不同的信息。第一个是电源指示灯，当设备接通电源时就会长亮。第二个是清扫指示灯，当处于清扫模式时，指示灯亮起，机器人开始进行清扫任务，结束时指示灯熄灭。第三个是系统状况指示灯，当系统处于正常状态时，此灯闪烁，当系统出现问题时，例如 RS485 通信失败等异常情况，此灯就会停止闪烁。

驱动模块：考虑到整体运行性能的稳定性，本系统选择直流无刷电机，相较于直流有刷电机其易于控制且无需更换碳刷，使用寿命长，性能更优异。并统一选择采用 FU6802 集成芯片来驱动电机转动，获取相关的电机信息。

2.2.2 通信模块硬件设计

通信模块的硬件设计如图 2.3 所示。这一模块主要包含：RS485 模块，蓄电池状态监测模块，外部 Flash 模块，Cat.1 模组，复位模块，电源管理模块等。

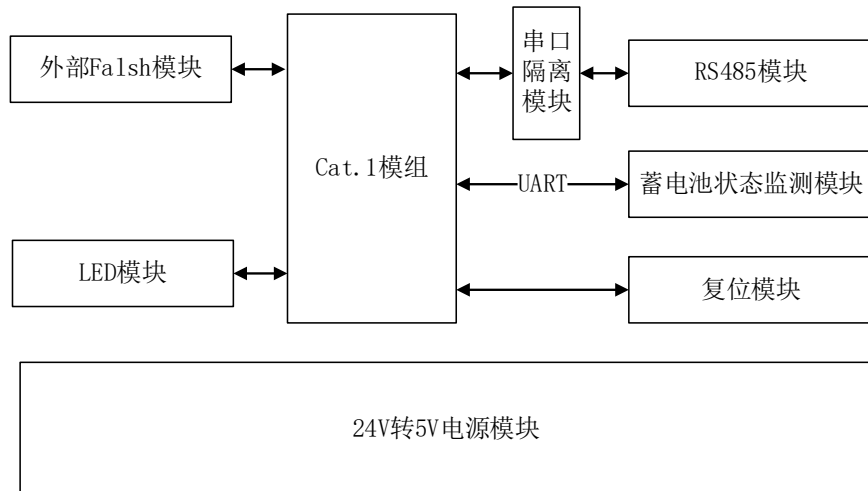


图 2.3 通信模块硬件功能总体框图

外部 Flash 模块：由于设备部署在室外环境，可能存在长时间断线的情况。当大量数据需要在设备离线时进行本地存储，这就需要采取外部 Flash 模块对所采集的数据进行存储。此模块为按需添加。

蓄电池状态检测模块：蓄电池状态检测模块用的是 Smart-N5 系列的太阳能控制器模块，通过 UART 串口与 Cat.1 模组进行通信。这是一款专为太阳能系统使用的智能编程控制器，可降低整个系统的成本。它不仅具有能读出蓄电池的电压，电流，温度，状态等的信息，还

有防水，耐温高等在恶劣环境下的稳定控制的能力。

RS485 模块：此接口与光伏清洁机器人设备相连，进行数据交换。对于复杂的室外环境使用，需要考虑抗干扰的能力，因此加入光耦隔离部分。

LED 指示灯模块：指示灯一共有三个，分别表示不同的信息。第一个是电源指示灯，当设备接通电源时就会长亮。第二个是系统状态指示灯，系统处于正常状态时会长亮，当程序遇到异常或者通信出现中断等情况，灯会闪烁，表明系统出现故障需要进行修复。第三个是联网状态指示灯，快速闪烁说明正在进行基站附着过程，长亮则说明联网成功，可以与云平台建立通信。

复位模块：复位模块使用的是 SP706 芯片，当设备的代码运行出错时，复位模块开始运行，对整个设备进行重启。

Cat.1 模组：采用的是合宙 Air720UG 芯片模组，该模组可以通过 AT 指令连接上基站，之后可以进行通信模块与云平台的数据交互。在室外场景的无线联网方式上，Cat.1 通信技术可以无缝接入 LTE 网络中，使用现有基站，降低了网络覆盖成本。

2.3 嵌入式软件设计

2.3.1 电控模块软件设计

电控模块是光伏清洁机器人执行具体业务逻辑的主体部分。如图 2.4 所示，机器人的所有参数相关设定，清扫模式控制，电机控制，故障处理等，都在这个模块实现。

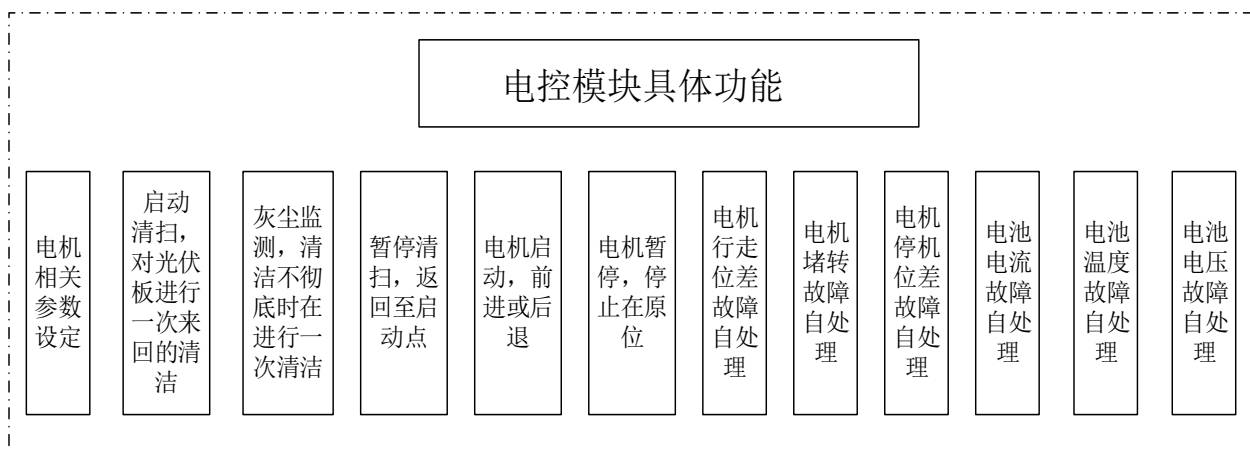


图 2.4 电控模块的具体功能图

电控模块主要采用的是 GD32F103RCT6 作为主控芯片对外设的模块进行控制。当主控板上电后，首先对所有需要用到的相关引脚进行初始化，然后立即通过 RS485 与通信模块进行通信。当确认与通信模块建立正确连接后，控制驱动模块开始故障自检，例如是否存在位移偏差过大，限位开关是否检测到等。倘若都没有以上故障出现，则开始等待接收启动信号。当接收到红外模块的操作信号，或者是接收到 RS485 串口的操作指令，此模块将会执行通过控制电机执行相应的操作。

电控模块的整体工作流程如图 2.5 所示。

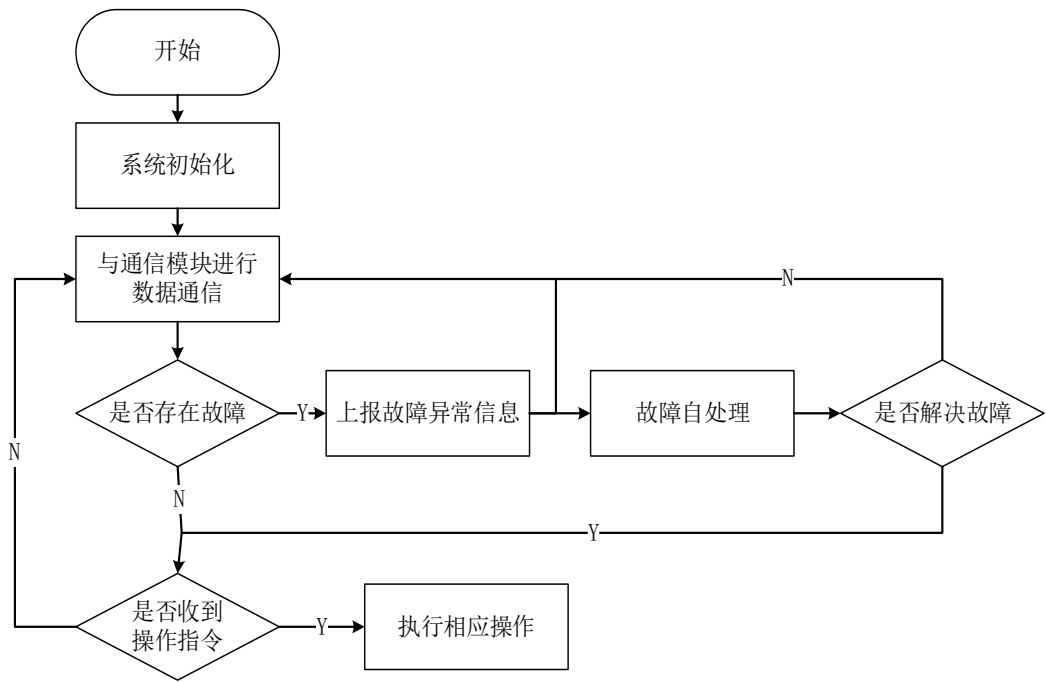


图 2.5 电控模块的整体工作流程图

2.3.2 通信模块软件整体设计

通信模块的软件设计如图 2.6 所示。本系统在实际运行过程中，有大量的外部事件和数据产生，为了能够实现足够快的速度对其进行处理和响应，有必要引入实时操作系统，来保证系统的实时性和可靠性。

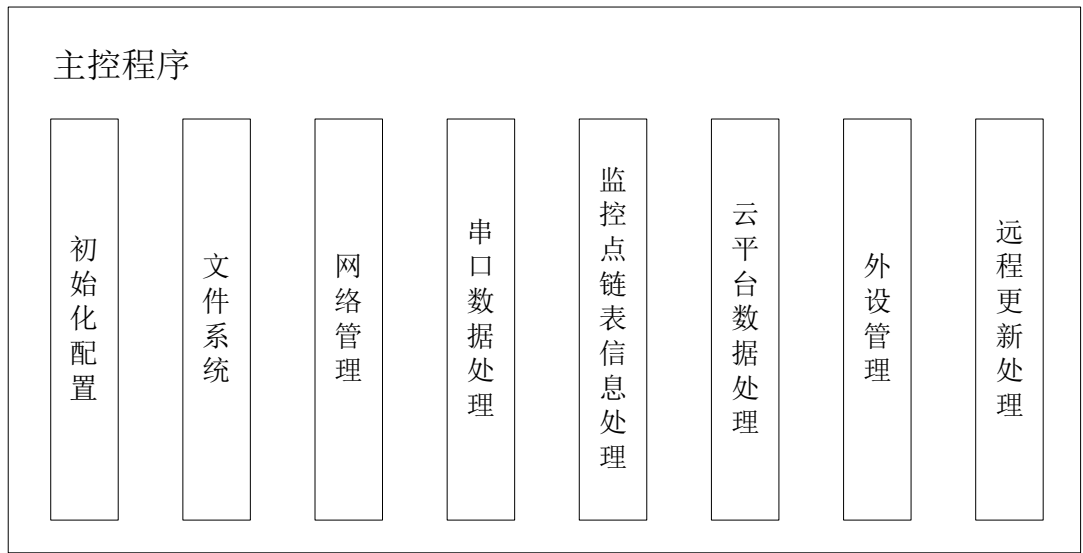


图 2.6 通信模块的软件设计图

FreeRTOS 作为一套开源轻量级实时操作系统功能强大，拥有包括任务调度、资源管理、外设配置、实时性高、占用主控资源少等特点。同时该系统的防止死锁功能可以降低光伏清洁机器人宕机的问题，提高本设备的安全性能，完美适配本系统的需求^[57]。

根据本系统的需求，对通信模块的工作流程进行了梳理。本文通信模块的程序主要有 4 个线程构成，分别是网络状态管理线程，与电控模块和电源模块数据通信线程，云平台通信线程和数据处理线程。在这四个线程中，网络状态管理线程的优先级最高，当设备处于断网状态时，则无法和设备云之间进行通信。其他线程管理的优先级都是一致的，FreeRTOS 会给每个线程以固定的时间片，轮流执行不同的任务。通信模块整体工作流程图如图 2.7 所示。

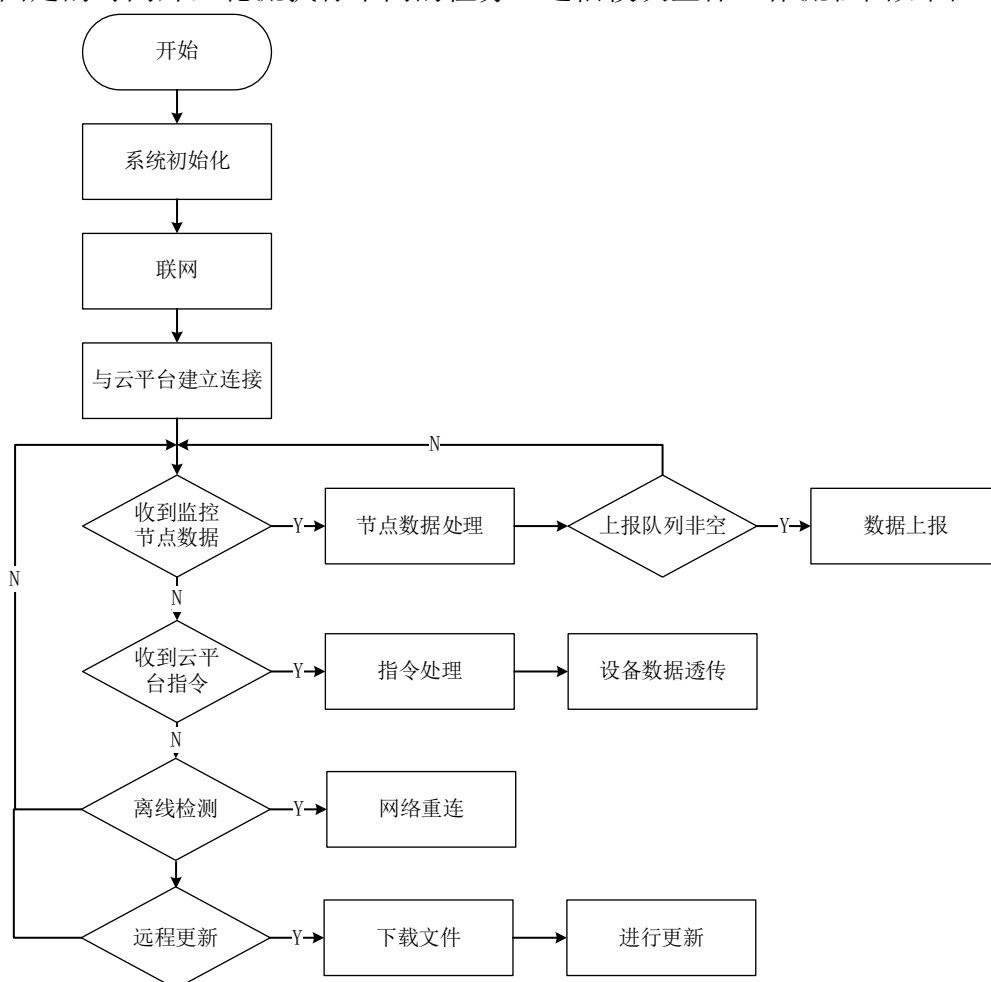


图 2.7 通信模块工作流程图

2.3.3 通信协议设计

2.3.3.1 通信模块与电控模块通信协议设计

通信模块与电控模块之间的通信采用 RS485 总线来进行连接，通过 Modbus 这一工业上常见的串行通信协议来保证传输的可靠性^[58]。

Modbus 属于应用层协议，在开发过程中分为主机和从机。Modbus 协议分为 ASCII 和 RTU 两种不同的数据格式，本文使用的是 RTU 数据格式，由地址、功能码、数据域和校验位四个部分组成。地址表示从机的编号；功能码也就是数据帧的命令，代表了主机对从机的操作，是读操作还是写操作，倘若出现操作错误的情况，从机回复时的功能码最高位置 1；数据域根据功能码的要求进行设置，主要包含需要操作的寄存器地址、数据长度数据内容等。校

验位采用 CRC16 方法计算错误校验码。在本文所设计的系统中，通信模块属于主机，电控模块属于从机。通信模块通过不停地发送使用 Modbus 协议的数据帧对电控模块的监控点进行查询。

2.3.3.2 通信模块与设备云通信协议设计

在与设备云通信中使用的是 MQTT 协议，广泛的应用于交通、家居、农业、工厂和医疗等领域。MQTT 协议作为一种轻量级协议，因其使用时网络开销少，占用网络带宽少，而被广泛运用在远程设备的连接、通信过程中。在本系统中，通信模块与设备云之间通过 TCP 协议建立连接，将数据封装成 MQTT 协议格式进行多对多的通信。

MQTT 协议数据帧分为固定头部、可变头部、消息体三部分。固定头部的主要作用是标识数据包的类型和分组。可变头部存在于部分数据包中，根据固定头部的信息来确定其是否存在以及具体的内容。消息体也被称为有效负荷，所要传递信息的具体内容存放在这一部分。

本系统在使用 MQTT 协议进行通信时，为了加快对信息的解析和生成速度，还使用 JSON 协议再次对信息进行封装。JSON 格式^[59-60]是一种轻量级的数据交换格式，支持多级嵌套，拥有良好的层次结构，便于阅读和编写，通用性强。JSON 格式的数据在传输时，由于需要的网络带宽小，常常在嵌入式网络设备中被使用。通信模块和设备云之间数据通信流程如图 2.8 所示。

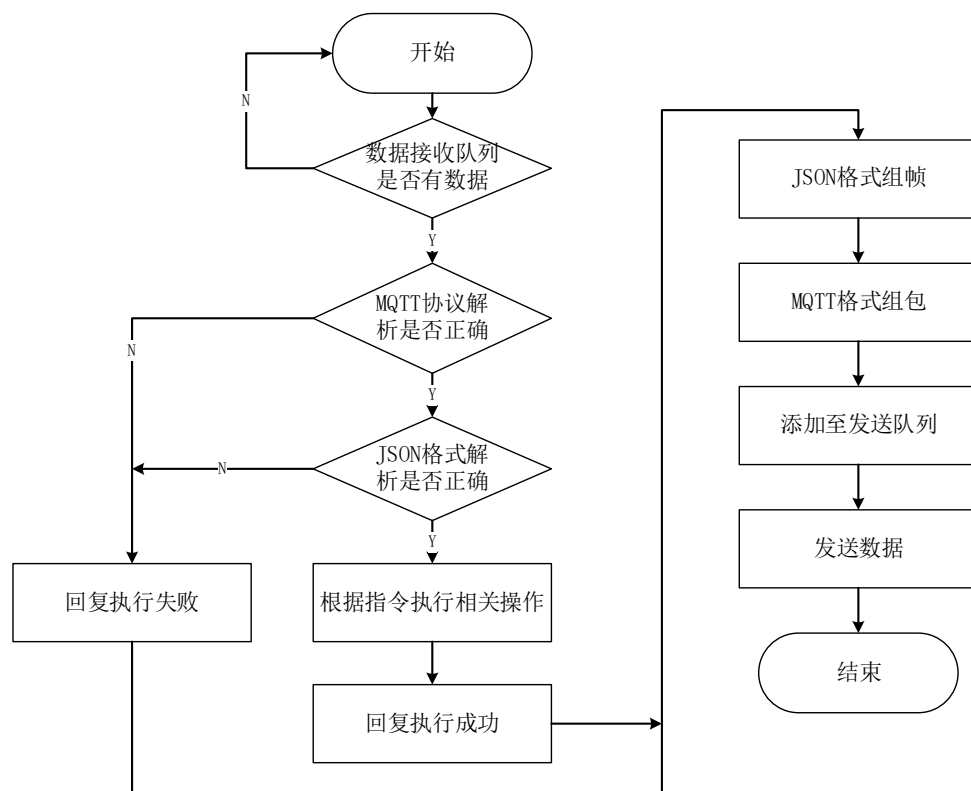


图 2.8 通信模块与设备云之间数据通信流程图

2.3.4 数据处理流程

2.3.4.1 通信模块与电控模块数据处理流程

通信模块和电控模块的数据通过 RS485 进行通信，以监控点的形式对数据进行管理。每台设备都有一个设备链表，其中包含读写操作节点，需要上报的监控点属于读操作节点，需要修改的监控点属于写操作节点。写监控点的优先级高于读监控点。

首先，通信模块获取设备结点指针，从这个指针指向的结构体中，获取需要操作设备的读、写监控点的指针。由于写监控点的操作等级高于读操作监控点，所以在数据进行通信时优先查询写监控点的指针是否为空，若有数据则先进行写操作，待全部处理完成后，再进行读操作流程。之后，通信模块处于等待回复的状态期间，一直查询串口接收队列中有无未处理的数据，若超过 2 秒钟串口接收队列还未收到数据，则说明两模块之间的通信出现断路；若接收到数据，根据发送数据的类型是读操作还是写操作，对该数据帧进行相对应的处理。最后将操作指针指向下一个写或读的监控点，表示一轮通信流程结束。通信模块与电控模块的数据处理流程设计如图 2.9 所示。

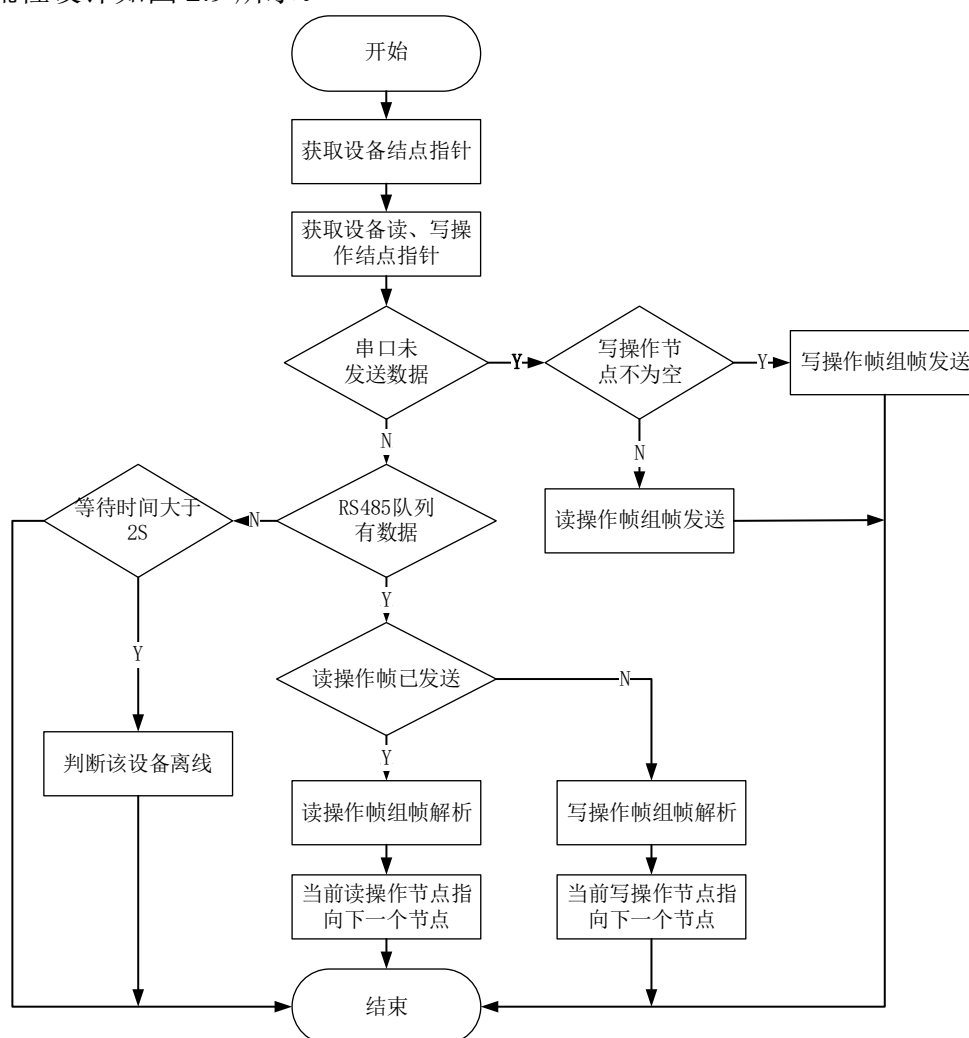


图 2.9 通信模块与电控模块的数据处理流程图

2.3.4.2 通信模块与云平台的数据处理流程

通信模块与云平台的数据处理包括数据上报处理, 下发命令处理, 远程更新代码处理等。通信模块上报的数据信息包括联网时间也即心跳帧(一分钟上报一次), 代码版本号, SIM 卡号, 模组的 IMEI 码号等设备的基本信息, 还有监控点要上传的设备参数信息。这些信息首先经过 JSON 格式组帧, 之后通过 MQTT 协议进行组包, 添加到数据上报的队列中, 通过 TCP/IP 协议, 将数据传输至云平台。

下发命令处理流程是云平台首先通过 TCP/IP 协议下发指令给通信模块, 通信模块根据 MQTT 协议解析。若是命令的下发指令, 处理和数据的上报处理的通信数据是以 JSON 格式封装后再封装以 MQTT 格式。通信模块将接收到的命令解析完成后, 通过协议中的具体指令做出对应的操作。指令具体有控制设备运行, 添加监控点, 修改设备信息等。若指令是控制设备运行的, 处理之后的数据以监控点的形式重新封装, 并添加到相应的数据队列中。通信模块与云平台的数据处理流程设计如图 2.10 所示。

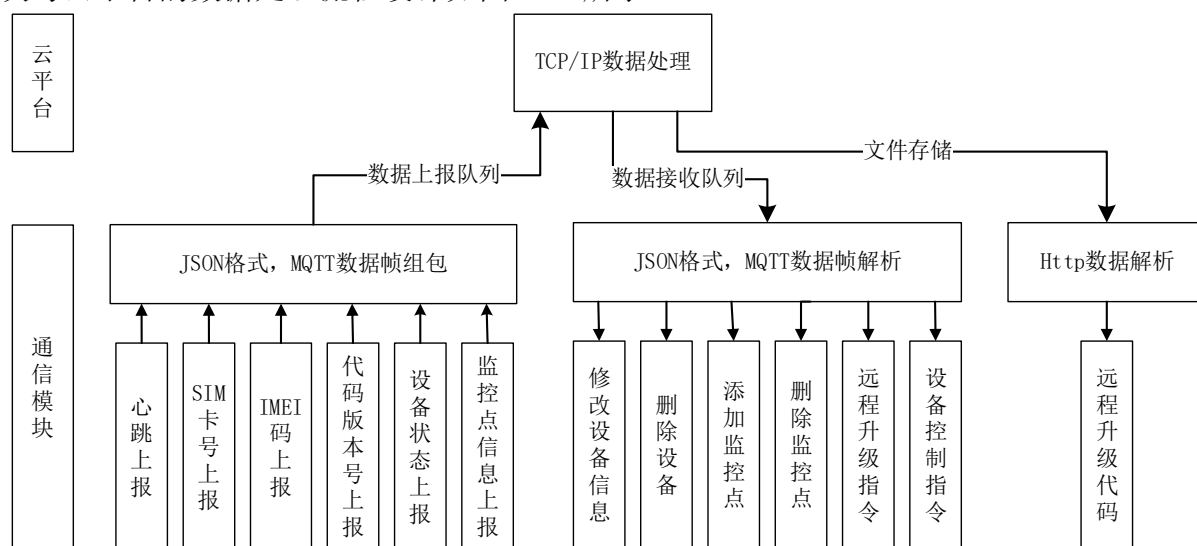


图 2.10 通信模块与云平台的数据处理流程设计图

2.4 应用软件设计

2.4.1 云平台设计

2.4.1.1 设备云

本系统采用的是中国移动公司提供的 OneNET 云平台来对设备的信息进行存储和管理。OneNET 云平台从物联网相关产业的特点出发, 建立了一套完整的生态环境, 支持多种通信协议类型, 支持多种智能网关等联网设备快速接入, 提供便捷、多样的 API 接口供系统的开发和使用, 大幅降低了物联网项目开发过程中的成本, 满足了项目开发过程中设备注册、通信稳定、数据存储、数据展示等需求。

设备通过通信模块与云平台进行数据交互, 按照 MQTT 协议, 将 JSON 格式的数据通过

通信模块上传至云平台。开发者首先进行产品注册，在获得设备注册码后，可以将设备注册在该产品下，并获得唯一的设备 ID，之后便可与设备进行数据交互。开发人员能够根据实际的项目需求，进行设备管理、数据查询，远程更新等功能。云平台的架构如图 2.11 所示。

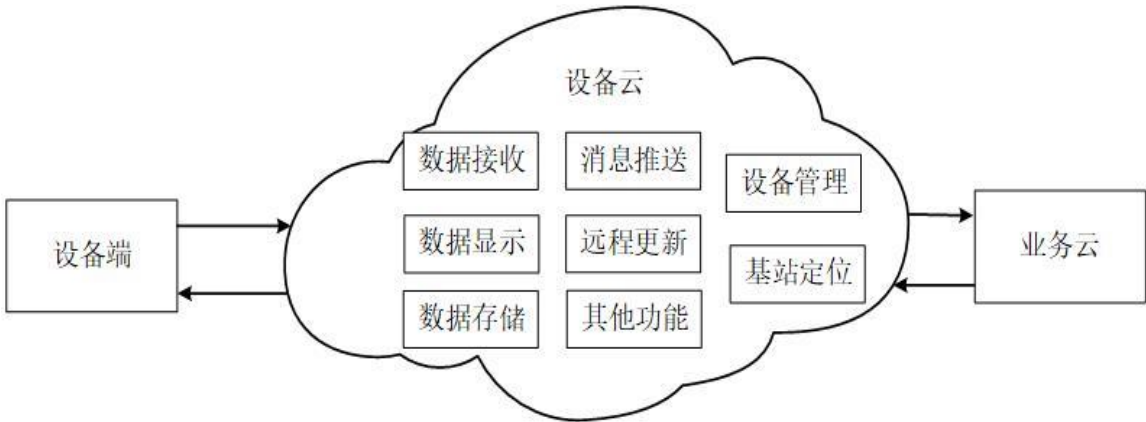


图 2.11 云平台架构图

2.4.1.2 业务云

业务云主要是一整套基于云原生和微服务的分布式系统，它的主要作用是提供光伏网站业务相关的服务，大致分为业务服务和基础服务。其中基础服务的主要功能是为核心业务提供基本接口，例如，获取云平台数据，调用服务器接口，权限控制等功能。业务服务包括电站显示，数据信息显示，天气预报等功能。具体功能如图 2.12 所示

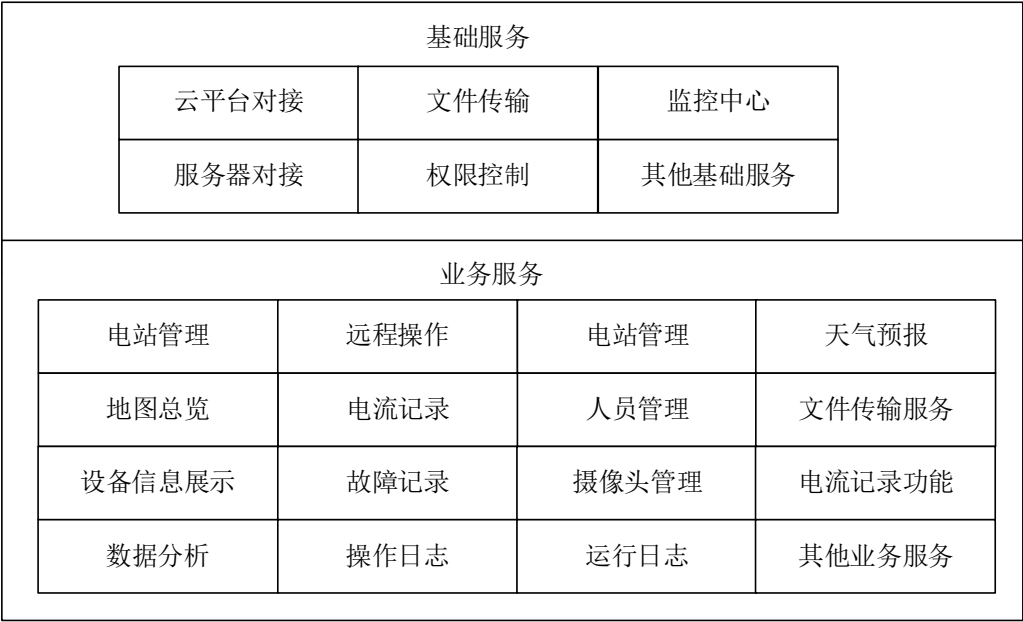


图 2.12 业务云主要功能示意图

2.4.2 Web 端设计

Web 端的主要作用是与用户进行交互、展示信息和操控设备的部分。由于 Web 端的功能十分繁杂，本系统采用的是 Vue 框架，由 HTML、CSS 和 JavaScript 构建，并提供一套声明式的、组件化的编程模型，其优异的扩展性能，满足了不同功能的需求，有效的提高了开发效率。用户管理实现了用户注册、登录，分类等功能；可视化展示能使用户更加直观的对设备的运行状态有所了解，不仅实时展现当前数据，还能查询历史操作信息、状态信息等数据。设备管理包括添加、删除新设备和设备监控点等行为。故障反馈是当设备出现故障时，在页面上出现醒目标识，提示运维人员进行相应处理。Web 端的功能如图 2.13 所示：

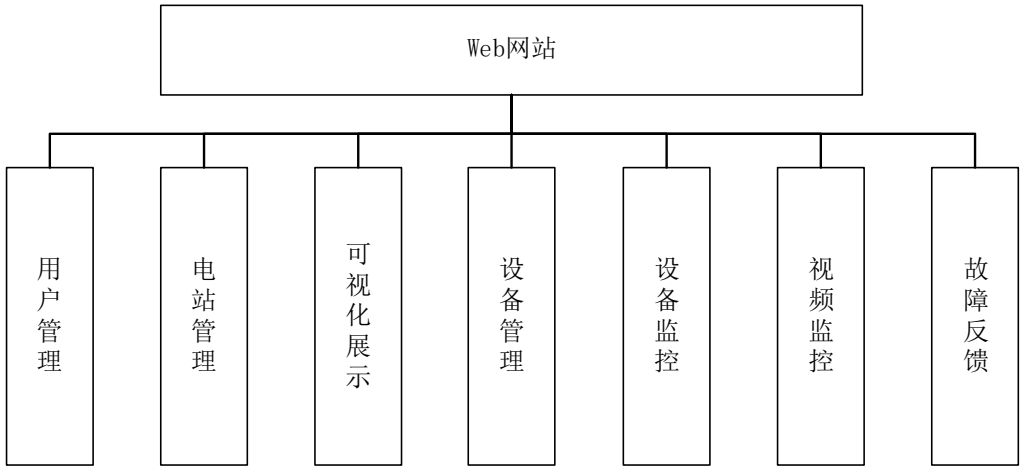


图 2.13 Web 功能设计图

2.4.3 小程序设计

小程序的开发使用了类 Web+原生组件形式，极大地提高了开发效率。通过调用后端接口，实现了与 Web 端功能一样的监控界面，极大的便利了运维人员在日常工作中对设备的监控，维护工作，提升了系统的灵活性与便捷性。

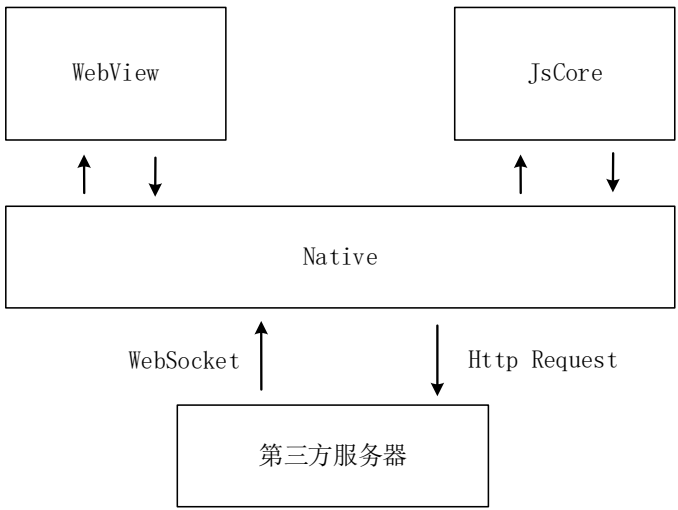


图 2.14 小程序通信模型图

2.5 系统效果展示

2.5.1 设备部分效果展示

图 2.15 为光伏清洁机器人实际安装展示图；图 2.16 为光伏清洁机器人测试时的具体结构展示图；图 2.17 为通信模块硬件图；图 2.18 为电控模块硬件面图。



图 2.15 光伏清洁机器人实际安装展示图

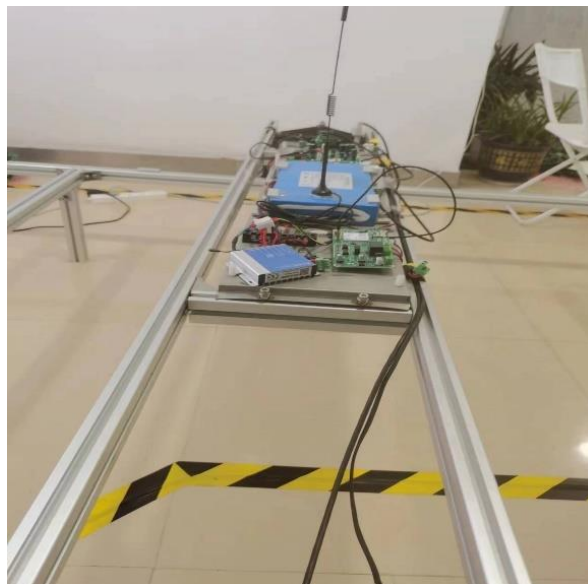


图 2.16 光伏清洁机器人具体结构展示图



图 2.17 通信模块电路板硬件图



图 2.18 电控模块电路板硬件图

2.5.2 Web 端部分效果展示

前端和客户端的设计是为了方便用户与设备进行信息交互。系统通过它们将设备的信息进行展示，将用户的指令进行下发。用户通过前端页面进行配置，将运维人员、光伏电站、光伏清洁机器人进行绑定。在设计该部分时，将用户角色分为管理员用户和普通用户。两种角色所拥有的权限是不同的，管理者可以通过操作前端和客户端对不同电站的设备进行添加、

删除等操作，相比普通用户拥有更高的权限。

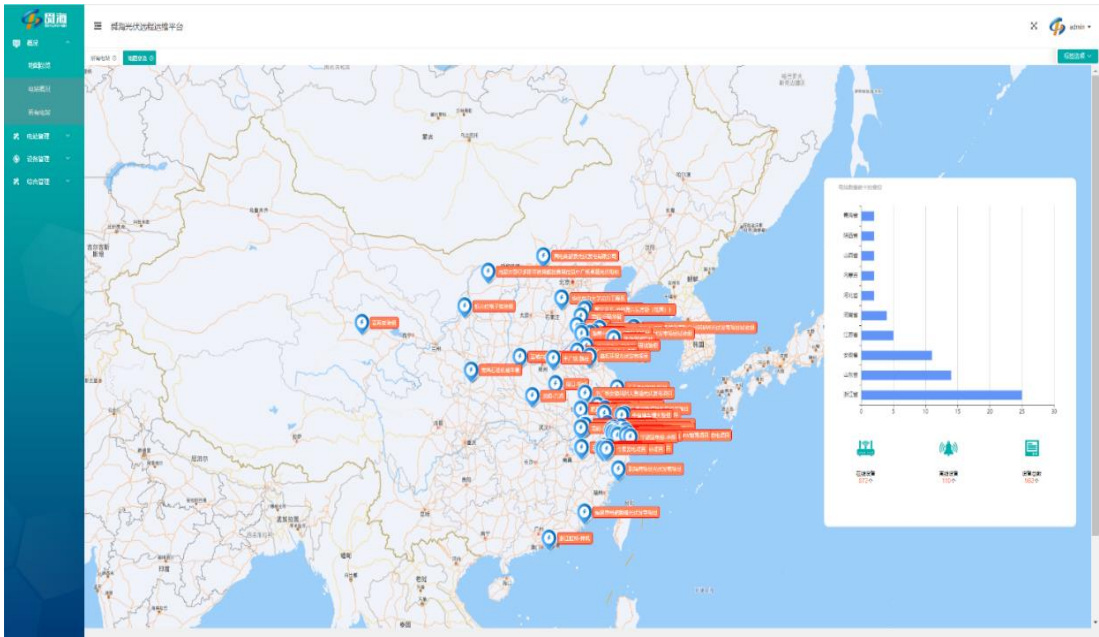


图 2.19 大屏展示图

图 2.19 为部署光伏清洁机器人电站的大屏展示图，可以清楚的看到目前本文所设计的光伏清洁机器人控制系统部署的电站分布已较为广泛。

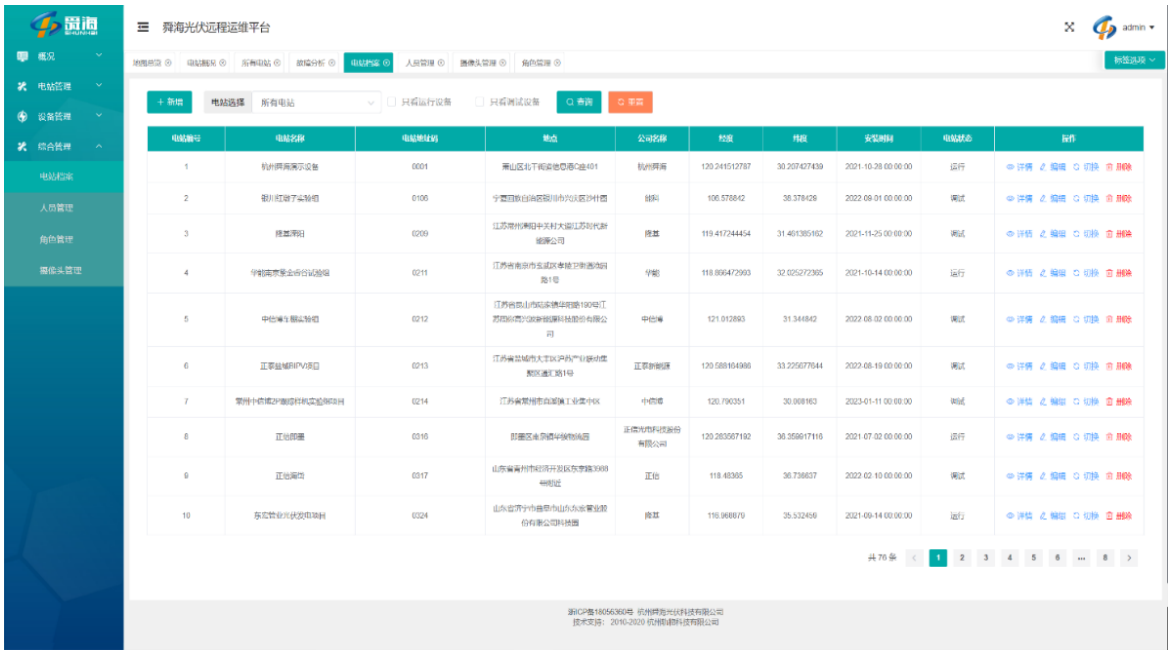


图 2.20 电站选择展示图

图 2.20 为选择需要监控的光伏电站，运维人员可以快捷的选择自己想要查看的电站。点开后有该电站下所有光伏清洁机器人设备的信息，便于运维人员的管理。



图 2.21 光伏清洁机器人相关参数展示图

如图 2.21 所示，该页面是对光伏清洁机器人的相关参数进行可视化展示，从这里了解到每一台设备的具体信息，包括运行状态，电机参数，电池参数故障信息等。

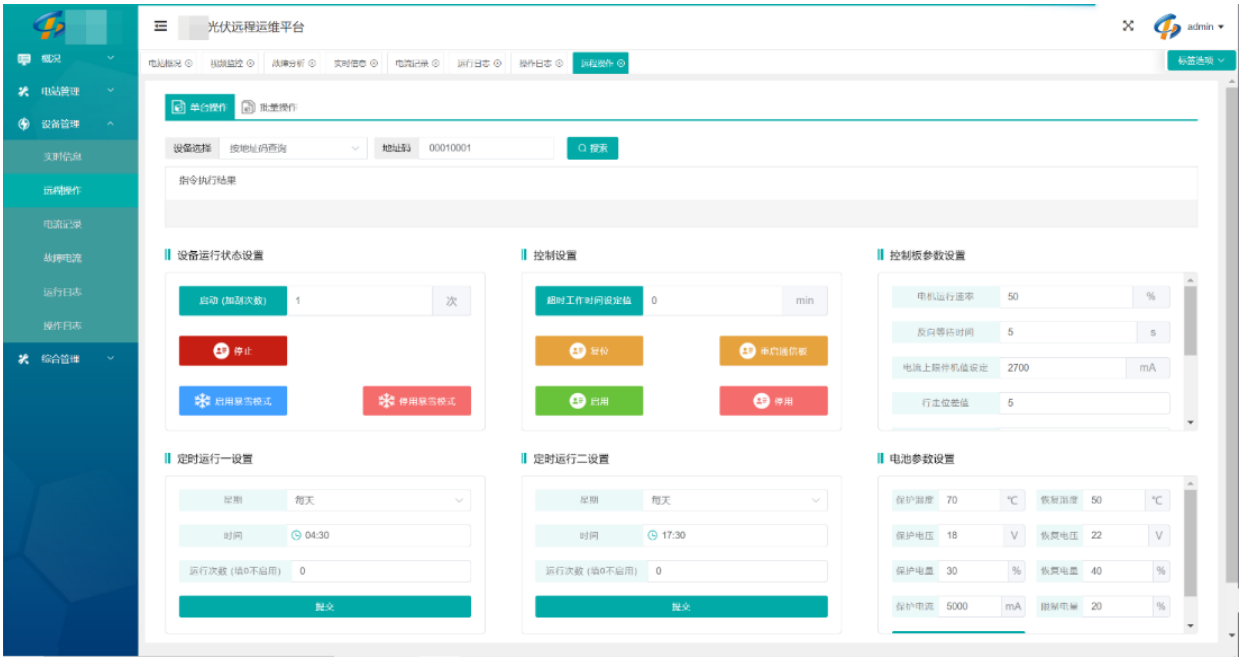


图 2.22 光伏清洁机器人参数配置图

如图 2.22 所示是对光伏清洁机器人参数进行远程设置的展示，可以在这个页面对光伏清洁机器人的相关参数进行修改，也可以控制其运行状态。

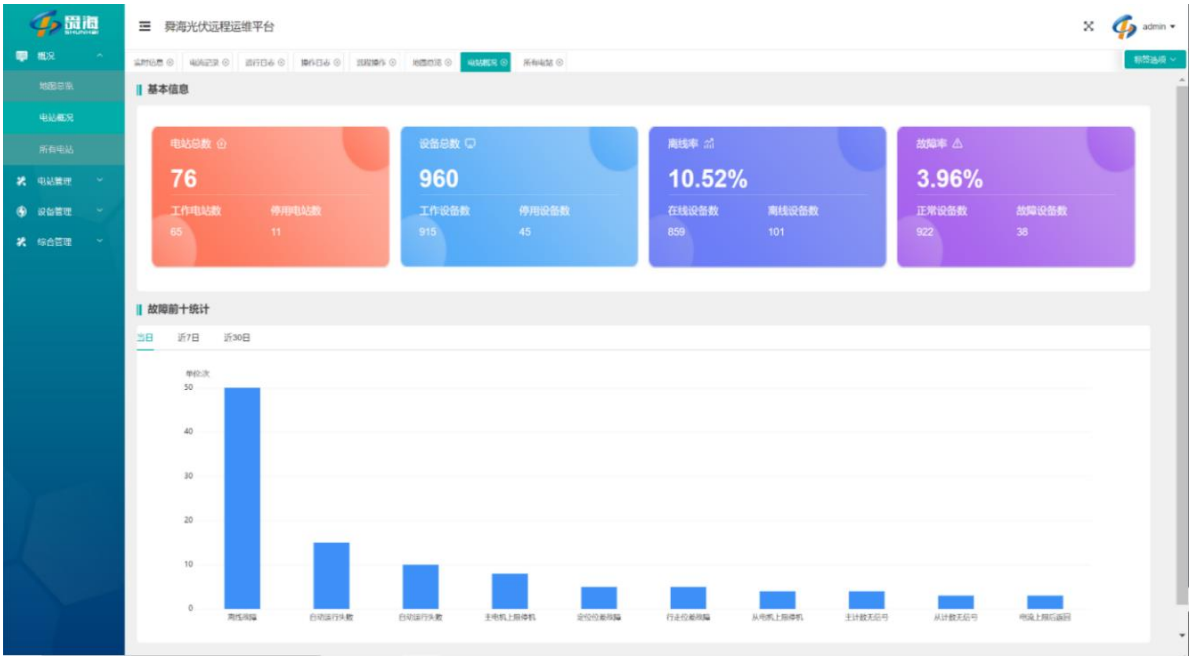


图 2.23 光伏清洁机器人故障整体展示图

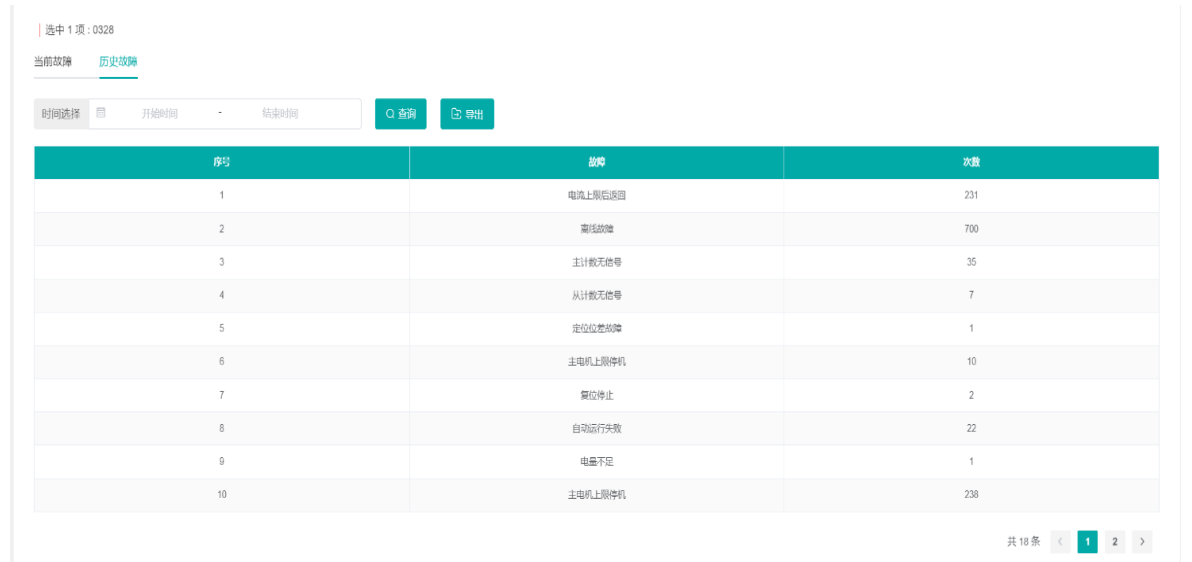


图 2.24 单台光伏清洁机器人历史故障统计图

图 2.23 和图 2.24 是所有光伏清洁机器人整体故障的统计和单台设备故障的统计。通过这此功能，可以直观的看到设备实际部署中，遇到的故障最多的是什么，然后通过分析，有针对性的对设备进行改进。

2.5.3 小程序部分效果展示

小程序部分效果如下图所示，图 2.25 为电站选择界面，图 2.26 为设备参数配置界面，图 2.27 为故障报警界面。小程序的搭建更加方便了运维人员对光伏清洁机器人的管理，可以随时随地地查看设备信息。



图 2.25 电站选择界面图



图 2.26 设备参数配置界面图



图 2.27 故障报警界面图

2.6 本章小结

本章首先对整个光伏清洁机器人系统的设计进行简单的介绍。然后对系统的各个部分的设计思路进行详细的介绍，包括了硬件电路板和软件设计流程，并针对系统中的通信协议，云平台，Web 端和微信小程序设计进行了介绍。最后对系统中的各个模块的效果进行整体展示。

第3章 基于模糊控制器的双电机同步控制系统设计

目前大规模集中式光伏电站大多部署于山区、戈壁等人迹罕至的恶劣环境中，光伏板上因风沙堆积的灰尘会严重影响发电效率。目前，轨道式光伏清洁机器人是清洁大规模光伏阵列最经济的手段之一。但其在实际运行过程中，因野外的恶劣环境干扰、光伏板安装不平整以及电机内参不一致等原因，会进一步使得双电机同步过程中同步误差增大，进而导致机器人会出现自锁、卡死在轨道上的现象。因此如何提高驱动轮的同步率，减少运行中的故障是本文研究的重点。

3.1 双电机同步系统的问题分析

本文开发的第一代轨道式光伏清洁机器人采用额外安装具有齿槽的支架，通过电机驱动齿轮的旋转，与齿槽啮合来使机器人在固定的轨道上运行。主电机按照固定速度往前运行，从电机通过对比主电机的转圈速，实时调整自己的转速。但是在对第一代光伏清洁机器人实际部署的运用中发现，上下行走电机之间错位的问题频繁出现，导致光伏清洁机器人在清扫过程中产生自锁，卡死在轨道上。为了解决这一问题，本文首先使用履带式设计代替轮式结构以提高设备的越障能力，之后着重研究双电机的控制算法和设计位置误差检测装置，使光伏清洁机器人能稳定的运行在轨道上，减少运行过程中故障的产生。

在双电机协同控制方面，汪继伟^[61]通过角度传感器来判断上下电机的行走位差，之后通过一个电机保持原速度运行，另一个电机改变自身速度，来使两个电机的相对位置保持一致。孙传有^[62]在双电机同步控制方面，对并行控制，主从控制，交叉耦合控制进行了对比，确认了交叉耦合策略的优越性。张莉^[63]将模糊控制运用在抹灰机的电机同步中，获得了不错的效果。

在检测位置误差方面，位置信息是一个难以检测的量，高精度的位置传感器成本较高，一般采用速度编码器积分的形式或者计数光电码盘的脉冲数来实现。但是这种方式存在累计误差，并不利于同步控制，因此本文根据双电机连线与光伏支架之间的角度值来反映位置误差信息。典型的角度传感器大致可以分为机械式测角，光电编码器，电位器式角度传感器，电容式角度传感器，霍尔角度传感器^[64]。但是他们在实际的使用过程中，都需要固定角度传感器本身，并且将需要测量偏转的物体固定于角度传感器的转轴上，不能使两者之间发生相对位移，这对本项目的机械结构设计产生了较大的困难。并且市面上所生产的角度传感器的价格昂贵，大大增加产品的生产成本。

本章将首先对直流电机数学建模并设计电机控制系统，之后对比分析几类双电机同步控制策略的优缺点并提出一种基于模糊规则的同步控制策略，然后针对位置检测成本以及精度

问题设计一款非接触式角度传感器，最后在实际系统上验证总体同步控制结构的合理性。

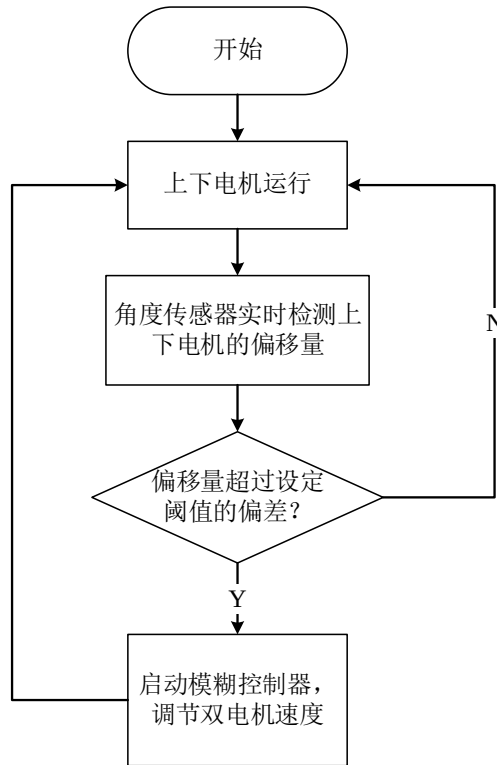


图 3.1 基于模糊控制器的双电机同步控制系统整体流程图

3.2 基于模糊控制器的双电机同步控制策略设计

双电机的同步方式可以分为机械同步和电同步这两种方式。其中机械同步主要通过齿轮咬合、机械轴、皮带、传送带等方式。其一般实现方式通过一个机械总轴实现对两台电机的连接，由一台主电机驱动通过机械总轴传递力矩，驱动从电机一起做同步运动。这种机械同步方案属于主从式，不仅硬件成本高、而且对主电机的性能要求也较高。因此并不适用于机器人的同步控制。

电同步的方式则相反。双电机直接并无直接连接，仅仅通过控制算法完成速度同步，控制器的控制精度决定了双电机的同步率。这种同步方式简化了电机连接的机械结构，降低了系统成本，还可以通过改进控制策略进一步提高同步控制性能。本小节将着重介绍双电机的电同步控制策略，并提出一种基于模糊规则的双电机同步控制策略。

3.2.1 电机控制系统的建模设计

在研究双电机同步控制策略之前，需要设计单电机控制系统。本文所设计的机器人行进过程的控制需求，采用内外环设计，即内环使用速度环、外环使用位置环。采用内外环设计相比直接单环控制具有更好的控制性能，且内环控制器设计与外环独立，外环设计时若内环控制性能较优异，可直接视作一阶惯性环节，简化了设计难度。控制器的选择上使用简单易实现的 PID 控制器。

3.2.1.1 PID 控制器建模设计

在实际的工程中，PID 控制因其具有结构简单灵活、实用性广、鲁棒性强、调参容易等特点，所以是目前使用最为普遍的控制器之一^[65]。主要的控制环节包括比例 K_p 、积分 K_i 、微分 K_d 三个部分进行线性组合，在形成新的控制量后，再对被控对象进行控制。其基本结构框架如图 3.2 所示。

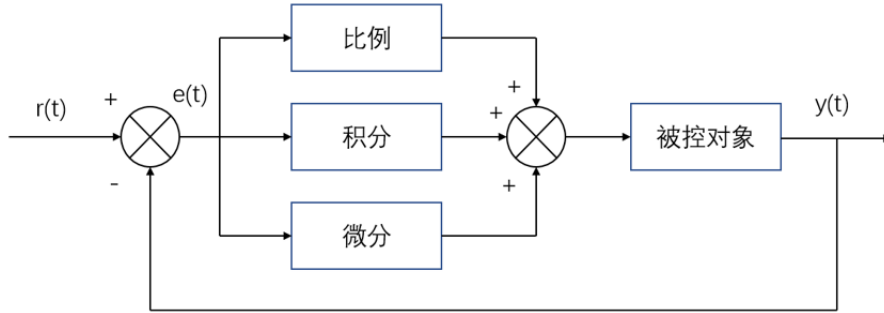


图 3.2 PID 控制原理结构图

上述图片的数学描述为下列公式：

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (3.1)$$

控制律表达式为：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.2)$$

式(3.1)和式(3.2)中 $r(t)$ 为系统的输入， $y(t)$ 为系统的输出， $e(t)$ 为系统反馈环节的偏差值， K_p 为比例系数， K_i 为积分系数， K_d 为微分系数

通常控制系统一般使用计算机实现，计算机系统属于离散系统，离散化后的离散 PID 表达式为：

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{i=0}^k e(i) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (3.3)$$

以下为 PID 控制中比例、积分、微分的作用：

比例部分：其本质就是比例放大器，对误差直接响应，因此控制器的响应速度和比例部分直接相关。比例系数越大响应速度越快，反之则越慢。其缺点在于仅依靠比例环节调节系统会存在静态误差，虽然增大比例系数 K_p 有助于减少静差，但极易造成系统的振荡，减弱系统的稳定性。

积分部分：此部分是为了消除比例环节所带来的稳态误差，提高控制系统的精确度。积分会对过去的误差信号进行累加，当累积到一定程度系统响应，以此消除稳态误差。增加积分系数 K_i 有助于系统更快的更准确的跟踪输入信号，当设置过大也会影响系统的稳定性。

微分部分：微分环节主要为了改善系统的动态性能。微分是对输入信号的变化量进行响应，对控制器输出有一个修正作用，抑制超调和高频抖动。增大微分作用可以有效地抑制超调，过大的微分作用则会增大系统的调节时间。

3.2.1.2 电机建模设计原理

一个合理且控制性能优异的控制器常常需要分析被控对象的数学模型。为了实际合理的控制器，首先需要建立一个合适的电机模型。

直流电机在运行过程中，主要存在着电机转速变化的机械过程和电量变化的电磁过程。在实际情况中，它们是同时发生的。因此，可以从直流电机工作的瞬时状态出发，通过建立电枢电压的平衡方程和转矩平衡方程，确定电机的传递函数。

电枢电压方程：

$$u_a = Ri_a + L \frac{di_a(t)}{dt} + E \quad (3.4)$$

反电动势方程：

$$E = C_E \cdot w(t) \quad (3.5)$$

磁力矩方程：

$$M_e = C_M \cdot i_a(t) \quad (3.6)$$

动力学方程：

$$M_e - M_{fz} = J \frac{dw(t)}{dt} \quad (3.7)$$

在式(3.4)、(3.5)、(3.6)和(3.7)中， R 表示的是电枢绕阻的等效电阻； L 表示电枢绕阻的等效电感； E 表示电机运行时的反电动势；反电动势系数为 C_E ； w 表示转子转速； M_e 表示电动机的电磁力矩，力矩系数为 C_M ； M_{fz} 表示负载力矩； J 表示等效转速惯量。

综上所述直流电机的数学模型如公式(3.8)所示，直流电机传递函数框图如图 3.3 所示。

$$\begin{cases} u_a(t) = Ri_a(t) + L \frac{di_a(t)}{dt} + C_E \cdot w(t) \\ J \frac{dw(t)}{dt} = C_M \cdot i_a(t) - M_{fz} \end{cases} \quad (3.8)$$

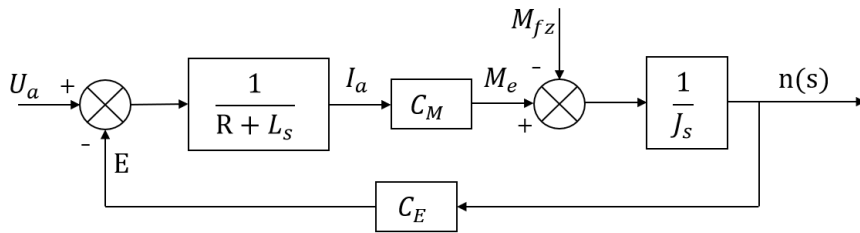


图 3.3 直流电机传递函数框图

3.2.1.3 电机控制器建模设计

单电机位置控制结构框图如图 3.3 所示。电机位置控制系统总体控制结构从外向内是位置环、速度环。位置环是用于位置的闭环控制，位置环控制器将接收到的位置控制指令与当前位置状态作差之后，经过计算产生速度控制指令。速度环接收到速度控制指令后与当前速度状态作差，产生电压控制指令。电机接收电压控制信号后调整运行状态。在内外环控制中，对于控制周期的要求不尽相同，内环控制周期短，外环控制周期长，一般内外环控制周期在 10 倍左右。

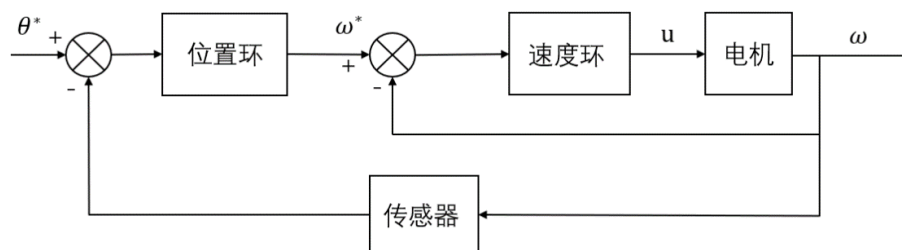


图 3.4 单电机位置控制结构框图

3.2.2 交叉耦合同步控制策略的设计及验证

3.2.2.1 传统控制结构

(1) 主从同步控制策略：

主从同步控制，将其中一台电机作为主电机，其他电机作为从电机。主电机直接接受控制指令，主电机的输出转速作为其他从电机的控制指令，以这种方式完成电机的同步。其控制策略框图如图 3.5 所示。主从同步方式，依靠从电机速度跟随完成电机速度同步。电机的耦合是单向的，当主电机受到扰动发生速度变化，通过输出信号传递到从电机改变从电机速度。但是从电机的速度扰动不会影响到主电机运行。这种信息的单向传递不仅不利于速度同步，还会产生滞后性。另外主从同步的控制精度依赖于主电机的控制精度，因此对主电机的性能和控制器提出了较高的要求。所以，该同步方式适用于控制要求精度不高的工业场合。

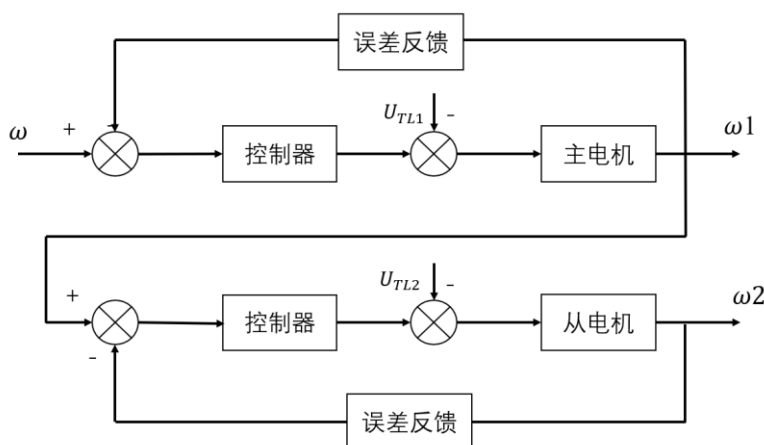


图 3.5 主从同步控制策略框图

(2) 交叉耦合控制策略:

交叉耦合控制方式与其他控制方式最大的不同在于其耦合结构实现了不同电机单元之间双向信息传递。通过对两电机之间速度作差后，经过差速反馈控制器补偿给电机各自的控制器。这样的结构保证两个电机中任意一个电机产生速度变化，都可以经过差速反馈控制器对两个电机做出调整。因此这种同步控制结构相比主从同步具有较好的抗干扰能力和同步性能。其缺点是这种结构不适用应用于 3 台及以上的电机系统中。另外考虑到电机之间可能存在参数差异，可以对每个电机都设计一个差速反馈控制器。其控制策略框图如图 3.6 所示。

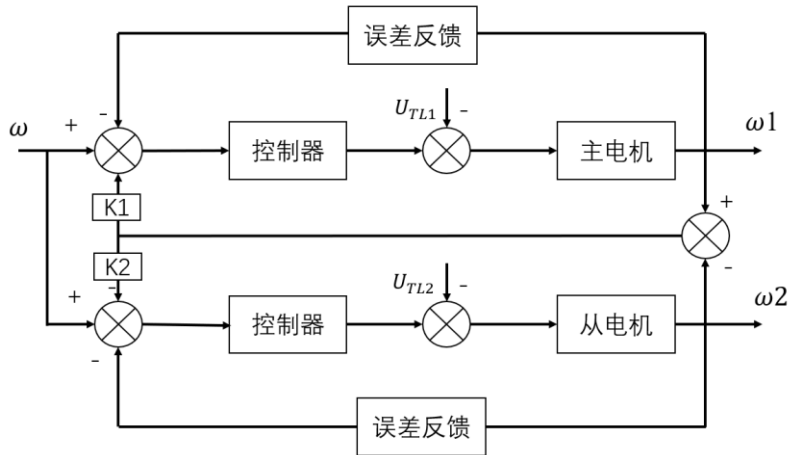


图 3.6 交叉同步耦合控制策略框图

(3) 虚拟主轴同步控制策略:

虚拟主轴同步控制策略的设计思路是参考了机械同步方式中的长轴传动，因此同时具有并联同步和主从同步的特点。虚拟主轴同步控制中，将使用控制器模拟机械长轴的作用即为虚拟主轴，各电机以并联的方式相连跟随虚拟主轴运行。虚拟主轴控制中，总轴与电机之间表现了主从控制的特点，各电机之间体现了并联控制的特点。其控制策略框图如图 3.7 所示。

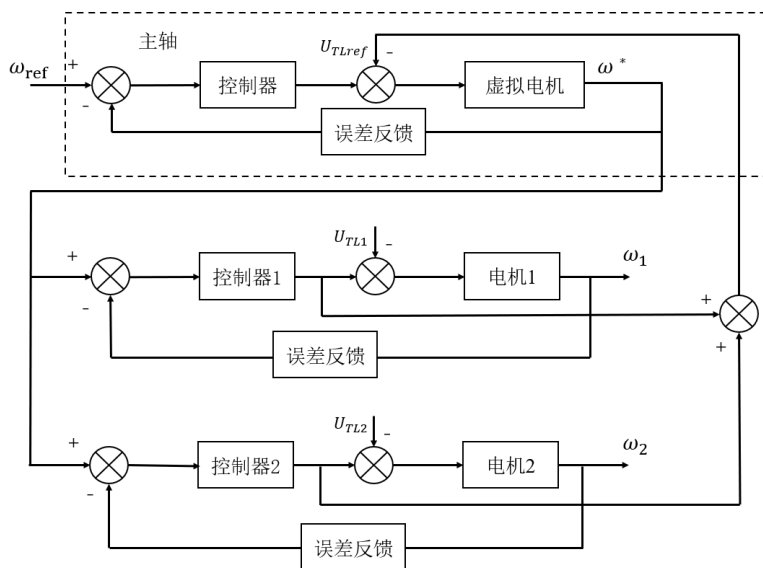


图 3.7 虚拟主轴同步控制策略框图

根据图 3.7 可知虚拟主轴同步控制中，虚拟主轴接收系统控制指令并将信号传递给各从轴电机，从轴电机运行过程中将其力矩和反馈给虚拟主轴，虚拟主轴根据反馈信号调整输出。相比主从控制，虚拟主轴控制多了从轴对主轴的力矩反馈，通过这种方式，各从轴电机通过虚拟主轴的桥梁完成了速度同步以及扰动调整，具有较强的抗干扰能力。但是虚拟主轴同步控制结构较为复杂，在 3 台及以上电机系统具有一定的优势，且由于其继承了主从控制的结构，因此电机对主轴的速度跟从仍有一定的滞后性。

(4) 位置同步控制策略：

上述同步控制策略应用在本文设计的清洁机器人上仍存在弊端。清洁机器人的双轮驱动的特点是两个电机之间无机械耦合，因此仅仅依靠速度同步，在速度同步期间的造成的位置误差并不会消除。如果累计的位置误差过大，机器人仍然可能出现轨道卡死的问题。需要对上述同步控制策略进行改进，设计一种位置同步控制策略。以交叉耦合同步控制策略为例，经过改进的交叉耦合位置同步控制策略框图如图 3.8 所示。在改进交叉耦合位置同步控制策略中，两个电机子系统的指令输入移动到了位置控制器前，差速反馈控制器接收位置信号并产生补偿修正量，补偿修正量反馈至位置控制器的输入端，修正电机的位置控制指令，实现双电机位置同步。

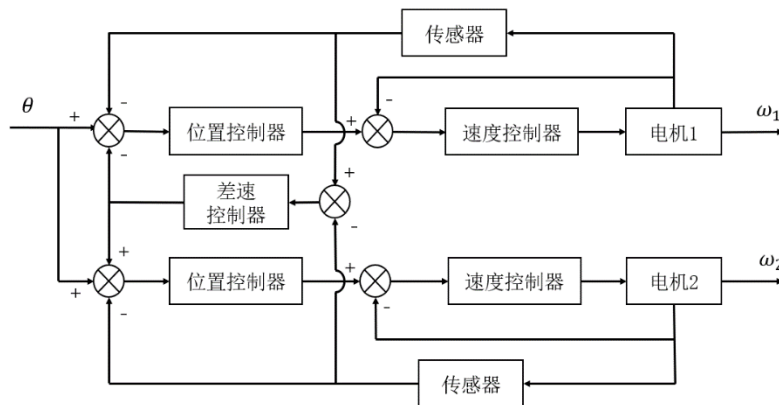


图 3.8 交叉耦合位置同步控制策略框图

主从位置同步控制策略框图制策略框图如图 3.9 所示。

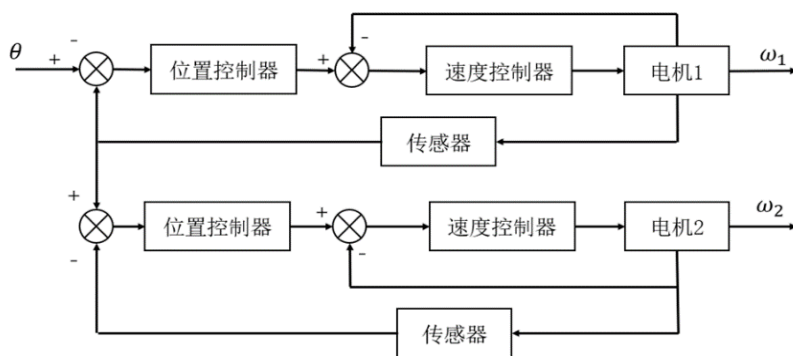


图 3.9 主从位置同步控制策略框图

虚拟主轴位置同步控制策略框图如图 3.10 所示。

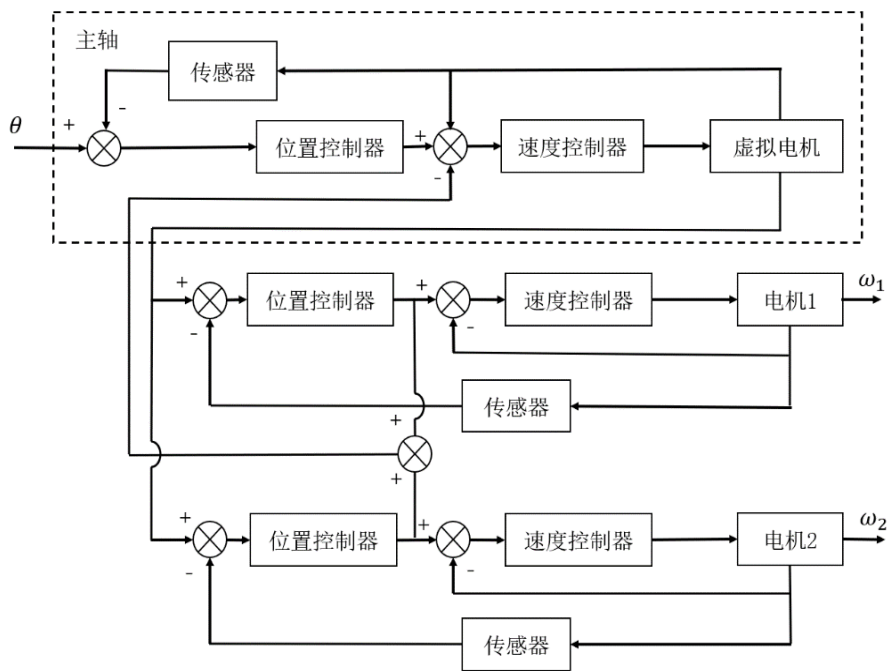


图 3.10 虚拟主轴位置同步控制策略框图

3.2.2.2 交叉耦合同步控制策略仿真实验及验证

为了验证并对比本节介绍的传统同步控制策略的优缺点，本节将在 Matlab/Simulink 仿真平台中搭建系统模型，在相同输入信号下加入扰动，通过对比不同的同步控制策略下双电机的位移误差曲线来验证同步控制策略的合理性以及优缺点。

在实际工程应用中，对于同一款电机我们很难保证电机参数完全一致。为了模拟实际电机的参数差异，在仿真模型中各电机参数如表 3.1 所示。

表 3.1 电机的相关参数

电机参数	电机 1	电机 2
额定电压	24V	24V
额定转矩	0.32N.M	0.32N.M
反电动势常数	4.27V/KRPM	4.27V/KRPM
转子惯量	11.9Kg.mm2	12KG.mm2
力矩常数	0.06N.M/A	0.06N.M/A
电枢电阻	0.42Ω	0.42Ω
电枢电感	1.12mH	1.18mH

为了模拟机器人实际运行状态，输入信号选择斜坡位置信号。扰动采用直接位置偏差方式，模拟运行时遇到的干扰。

各同步控制策略仿真结构图如图 3.11、3.12 和 3.13 所示。

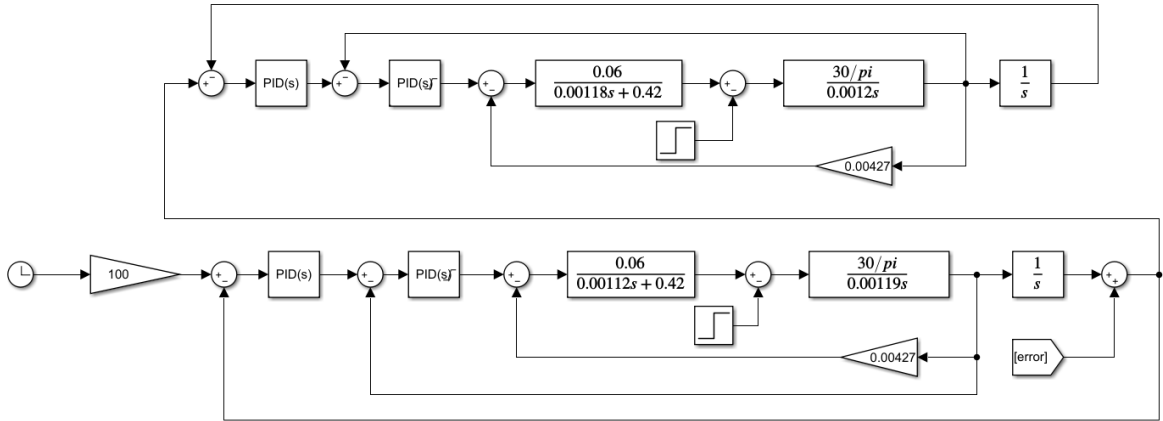


图 3.11 主从同步控制仿真结构图

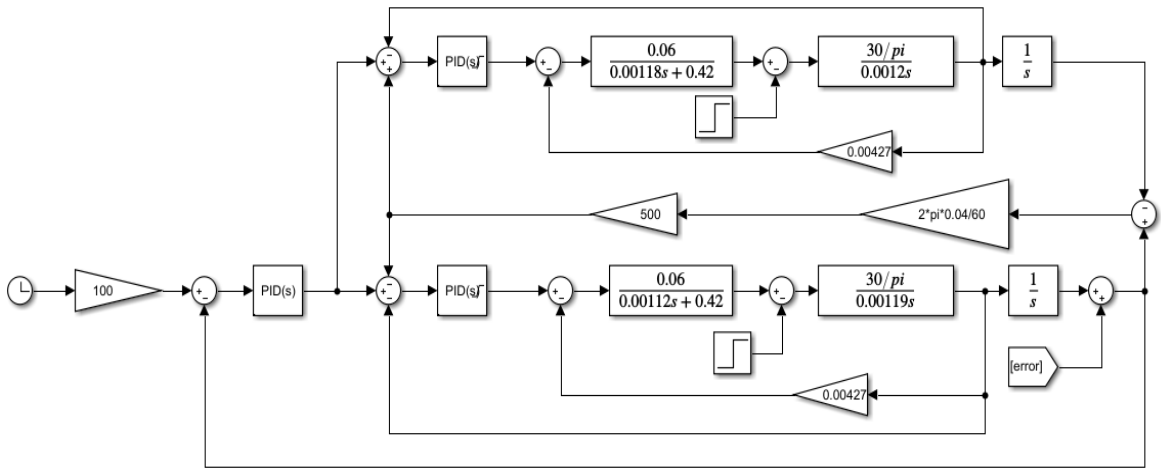


图 3.12 交叉耦合控制仿真结构图

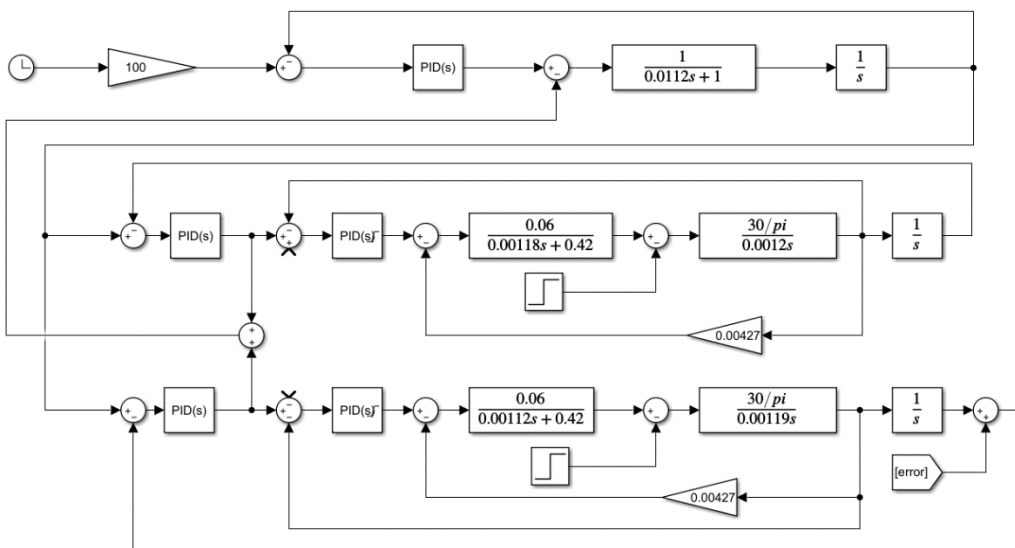


图 3.13 虚拟主轴同步控制仿真结构图

在 100rad/s 的斜坡位置信号的输入下, 电机运行至 1 秒时, 给予 20cm 的误差。各同步控制策略下双电机位移误差曲线如图 3.14 所示。

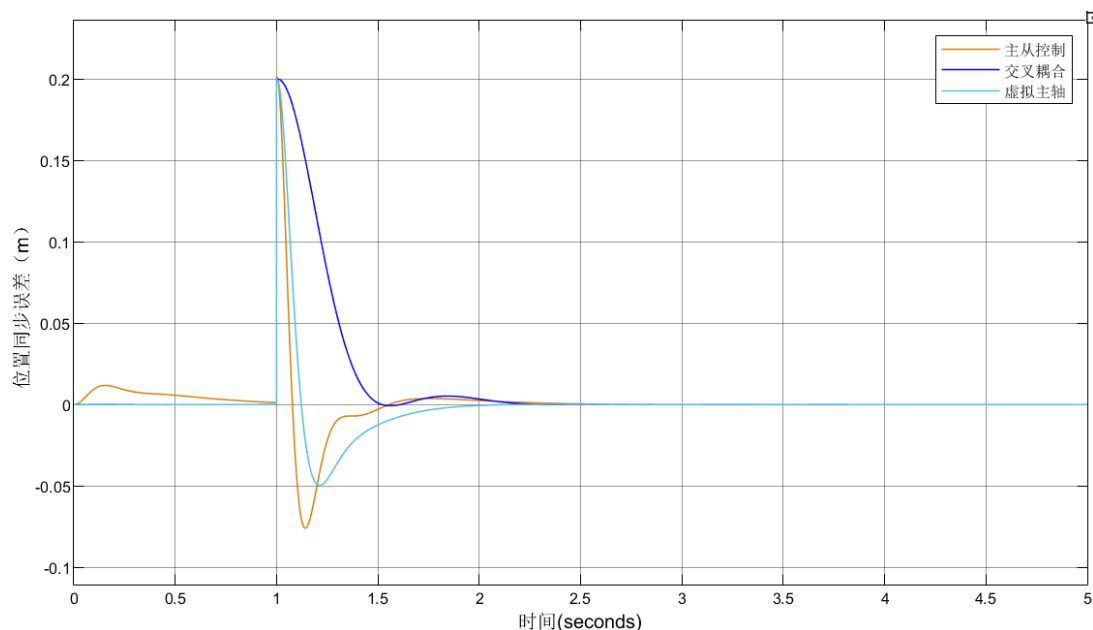


图 3.14 三种控制方式下双电机位置误差的仿真结果对比图

主从同步控制的效果最差。首先电机上电阶段就出现了位置误差, 这是由于主从同步控制中从电机的指令来自主电机的位置输出, 因此主电机处在启动阶段时位置输出比控制指令小, 导致从电机启动较慢。由于结构导致两个电机的滞后性, 在图 3.14 上体现在系统刚上电时, 位置误差先增大, 随着主电机输出稳定后从电机跟随主电机输出稳定下来, 两个电机位置误差开始逐渐减少。稳定后当出现位置误差出现突变之后响应速度很快, 同时也产生了较大的超调, 这是由于误差突变产生在主电机, 主电机根据系统位置指令调整速度, 从电机以主电机位置输出作为指令调整速度, 因此调整响应速度很快, 但是动态性能较差, 有较大的超调现象。

虚拟主轴同步控制效果相比主从同步控制, 电机上电阶段的位置误差消除了。由于双电机之间是并联结构, 同时接受虚拟主轴的位置输出, 上电启动速度相同。稳定后出现位置误差突变后, 两个电机随即调整, 并将速度反馈回虚拟主轴, 虚拟主轴输出指令调整电机速度, 因此相比主从同步, 超调量得到了一定程度的抑制。

交叉耦合控制的同步性能比主从同步优异的多, 首先由于交叉耦合属于并联控制, 系统上电后两个电机同时启动且启动速度基本相同, 故上电阶段两电机的同步误差很小。当系统突然施加一个位移误差突变后, 花费约了 1.2s 就稳定下来。但为了兼顾系统的动态性能, 不可避免的出现小幅超调和小幅的震荡, 导致调节时间较长。

综上所述。交叉耦合同步控制的同步性能最好, 兼顾了稳态性能和动态性能。

3.2.3 基于模糊控制器的交叉耦合同步控制策略改进

3.2.3.1 模糊控制原理

模糊控制是智能控制的一种^[66-67]，它把人的常识和经验转化为控制策略达到一种模拟人的思维进行判断和推理的控制方式。模糊控制属于非线性控制，对于一些难以建立准确的数学模型的复杂控制对象有着不错的控制效果。由于模糊控制的非线性，它还适用于具有迟滞、时变等非线性环节的控制对象。相比传统控制方法，模糊控制具有更强的鲁棒性。

模糊控制根据输入参数的维数进行分类。各类模糊控制示意图如图 3.15 所示。一维模糊控制器如图 3.15(a)所示，输入参数仅有输入值的偏差 e ，因此难以体现控制对象的动态特性，故一般只在一阶系统中使用。二维模糊控制器如图 3.15(b)所示，采用输入给定偏差值 e 以及导数 $\dot{e}$ ，可以很好的体现控制对象的动态特性，控制器的动态性能比一维控制器优异很多，也是目前应用最广泛的模糊控制器。三维模糊控制器如图 3.15(c)所示，采用输入给定偏差值 e 以及一阶导 $\dot{e}$ 、二阶导 $\ddot{e}$ ，虽然理论上的控制性能更好，但是由于其维数高而导致模糊规则设置更为复杂，因此三维模糊控制器应用较少。

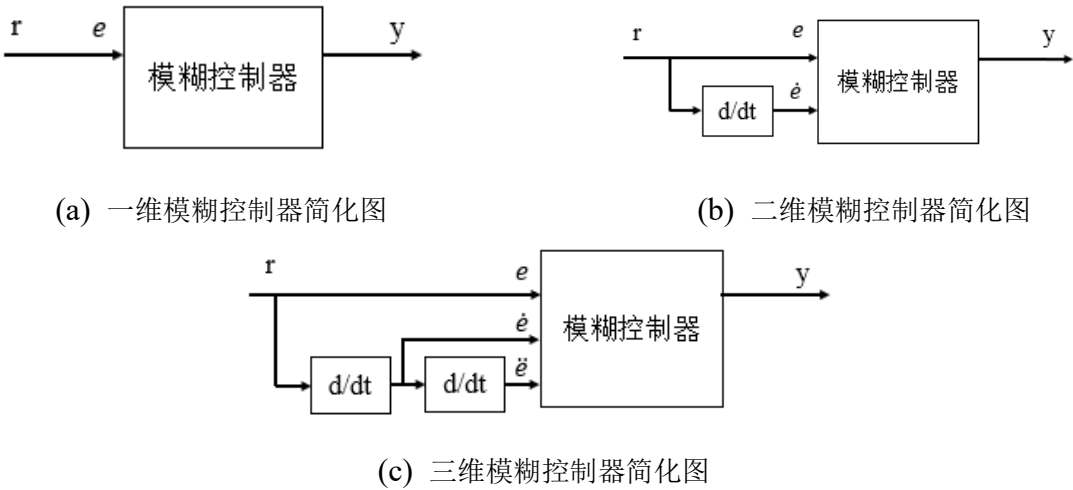


图 3.15 常见的模糊控制器

一般模糊控制器的原理框图如图 3.16 所示，包括模糊化、模糊推理机、解模糊和知识库。

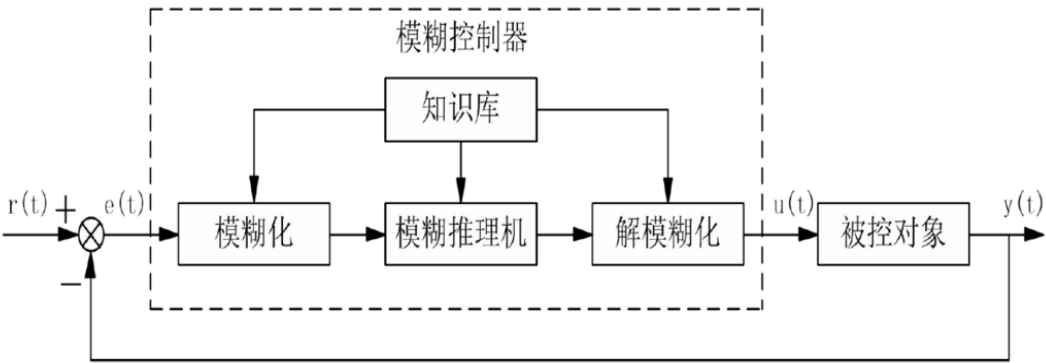


图 3.16 模糊控制的原理图

模糊化: 模糊化就是指将数字量转化为模糊量的过程。这一变化是模糊过程的核心环节, 只有将输入的数字量转化为模糊控制器可理解的模糊语言, 才能进行后续的步骤。模糊化首先将输入数字量经过一定比例转化到论域范围, 再经过隶属度函数将数字量转化为模糊语言。其中语言的数量会直接影响控制器性能。一般增加模糊变量可以提高控制器的精度, 但由于增加了计算量会降低系统的实时性; 减少模糊变量的熟练可以提高系统的实时性, 但会降低控制器的控制精度。因此需要根据实际系统来决定模糊变量的数量。

一般对于模糊变量的描述使用“正大、正小、零、负小、负大”, 为了简洁常常使用英文字母简写“NB、NS、ZO、PS、PB”。

知识库: 知识库是专家经验的集中表现, 包含了数据库和模糊规则库。其中模糊规则库直接影响控制器性能, 模糊规则的条数过多, 使得模糊推理耗时过长不利于控制; 模糊规则过少又会影响控制器性能。

模糊推理机: 模糊推理机是根据模糊规则库, 将输入的模糊量经过推理转化为模糊输出量的过程。

解模糊化: 经过模糊推理得到了模糊输出量无法直接应用于系统控制, 需要进行解模糊操作, 将模糊输出量转化成数字输出量。解模糊的过程于模糊化相似, 也要经过隶属度函数。一般解模糊化有三种常用方法: 最大隶属度函数法、加权平均法、取中位数法。

3.2.3.2 模糊控制器的设计

传统交叉耦合同步控制中的差速反馈控制器常常选择比例控制, 但是比例控制的固有缺陷是, 对于信号的敏感程度不会随其大小而改变, 因为它是一个线性环节。当误差较大时需要一个大比例来对信号及时响应, 当误差逐渐减小大比例环节会对小误差过于灵敏, 可能会造成响应超调或者控制不稳。因此为了克服比例控制器的上述缺陷, 设计了基于模糊控制的差速反馈控制器, 接收误差信号及其导数作为输入, 实现控制输出基于两种信号进行动态调节, 保证控制器精度的同时还能有优异的动态性能。

(1) 确定隶属度函数

由上一小节可知, 模糊变量的多少会影响控制器的控制精度和实时性, 因此在本文设计的模糊控制器中, 对模糊子集进行划分使用了 7 个模糊变量, 如表 3.2 所示。

表 3.2 模糊子集划分

负大	负中	负小	零	正小	正中	正大
NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB

模糊变量确定后还需确定隶属度函数, 由于三角函数计算简单, 本文选择三角函数作为模糊控制器的隶属度函数。其中误差输入的隶属度函数如图 3.17 所示, 模糊论域为 $[-0.2, 0.2]$, 模糊子集为 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ 。为了提高系统的控制精度和动态性能, 通过将较大误差划分较宽以避免控制器频繁调整, 提高系统的动态性能; 小误差划分较细以对于小误差反应更灵敏, 提高控制精度。因此在整个论域中隶属度函数的形状不同, 靠近两边三角函数的

斜坡平缓些，越靠近中间斜坡更陡。

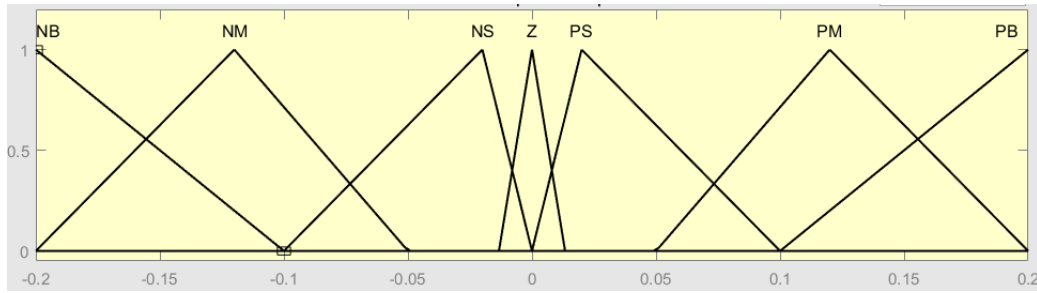


图 3.17 误差输入的隶属度函数

误差一阶导的隶属度函数如图 3.18 所示，模糊论域为 $[-0.8, 0.8]$ ，模糊子集为 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ 。同误差的隶属度函数不同的是，误差一阶导的隶属度函数形状均相同，因此在论域中误差一阶导对于模糊控制器的影响相同。

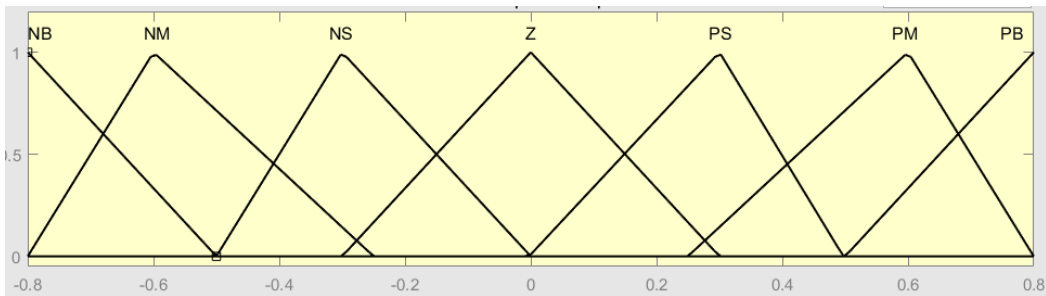


图 3.18 误差一阶导输入的隶属度函数

输出比例系数 K 的隶属度函数如图 3.19 所示，模糊论域为 $[-200, 1000]$ ，模糊子集为 $\{NZ, PZ, PS, PB\}$ 。其中一个模糊子集位于负区域主要用于修正超调现象。

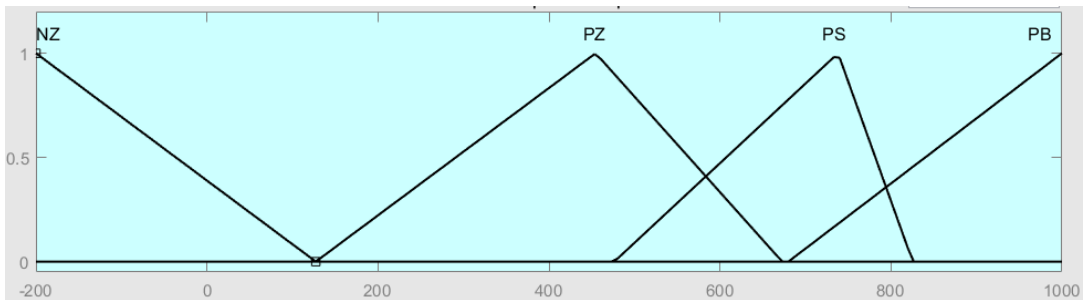


图 3.19 输出比例系数 K 的隶属度函数

(2) 制定模糊规则

模糊规则的设计是进行模糊控制的关键部分，它是研究人员长期实验后对经验的归纳和总结。因此模糊规则的是一种将人的经验判断和计算机相结合的产物。本文差速反馈控制器的模糊规则制定将基于以下几点经验：

- 1) $|e|$ 较大时，需要系统能够快速响应得到较好的跟踪效果，选择较大的比例 K 。
- 2) $|e|$ 中等大小时，为了避免超调。当 $|\dot{e}|$ 较大时将比例 K 调小， $|\dot{e}|$ 较小时为了动态性能仍选择较大的比例 K 。
- 3) $|e|$ 较小时，为了避免系统震荡选择较小的比例 K 。

根据上述经验, 结合 e 和 $\dot{e}$ 的 7 条模糊子集共有 49 条模糊规则, 如表 3.3 所示。

表 3.3 输出速度补偿的模糊推理规则表

		e						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ec	NB	PB	PB	PS	PS	NZ	NZ	PB
	NM	PB	PS	PS	PS	NZ	PZ	PB
	NS	PB	PS	PZ	PZ	PZ	PZ	PB
	ZO	PB	PZ	PZ	PZ	PZ	PZ	PB
	PS	PB	PZ	PZ	PZ	PZ	PS	PB
	PM	PB	PZ	NZ	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	NZ	NZ	PS	PS	PB	PB

(3) 解模糊化

经过模糊规则计算得到的输出量仍然是模糊量, 无法直接应用在计算机系统中, 需要进行解模糊处理转化成数字量。综合系统实际情况采用重心法计算输出量, 该方法具有计算量小且能满足一定的精度要求的优点, 其表达式为:

$$out = \frac{\int y\mu(y)dy}{\int \mu(y)dy} \quad (3.8)$$

$$out = \frac{\sum_{i=1}^l y_i \mu(y_i)}{\sum_{i=1}^l \mu(y_i)} \quad (3.9)$$

模糊控制规则曲面图如图 3.20 所示。

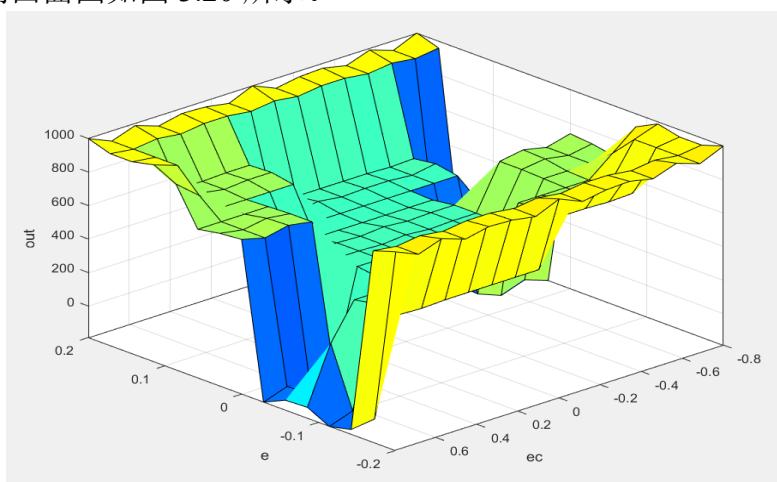


图 3.20 模糊控制规则曲面图

3.2.3.3 基于模糊控制器的同步控制结构设计

图 3.20 为基于模糊控制器的交叉耦合同步控制策略结构框图,由图 3.21 可知模糊交叉耦合控制相比交叉耦合控制最大的区别在于使用模糊控制器替代了原本的比例控制器。模糊控制器接收误差和误差变化率作为其输入,根据这两个变量自动调整比例系数,实现自适应的同步控制。

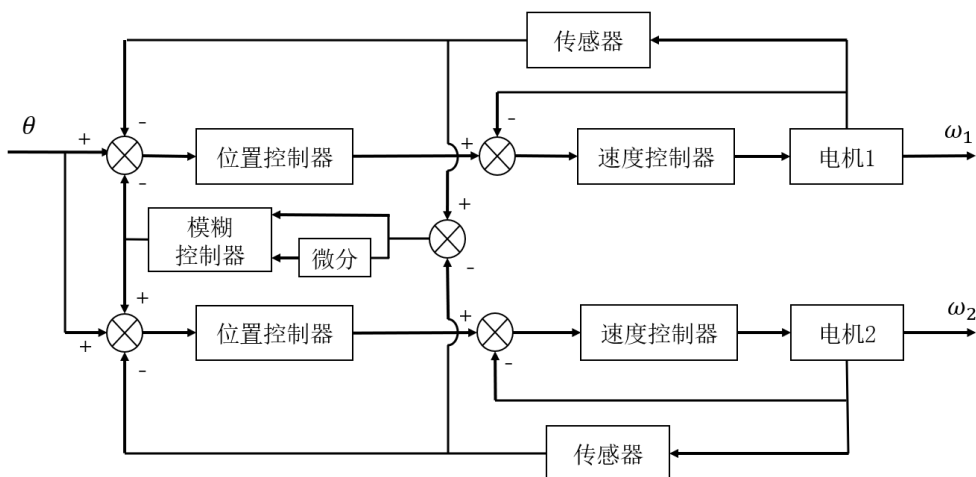


图 3.21 基于模糊控制器的交叉耦合位置同步控制策略框图

3.2.3.4 仿真实验及分析

为了验证本节设计的基于模糊控制的交叉耦合同步控制策略的合理性以及优越性,本节将在 Matlab/Simulink 仿真平台中搭建系统模型,在相同输入信号下加入扰动,通过与交叉耦合同步控制进行对比来验证本节提出的同步控制策略的优越性。

电机参数设置参考上一节仿真验证中所使用的电机参数,详情见表 3.1。

基于模糊控制器的交叉耦合同步控制仿真结构框图如 3.22 所示。

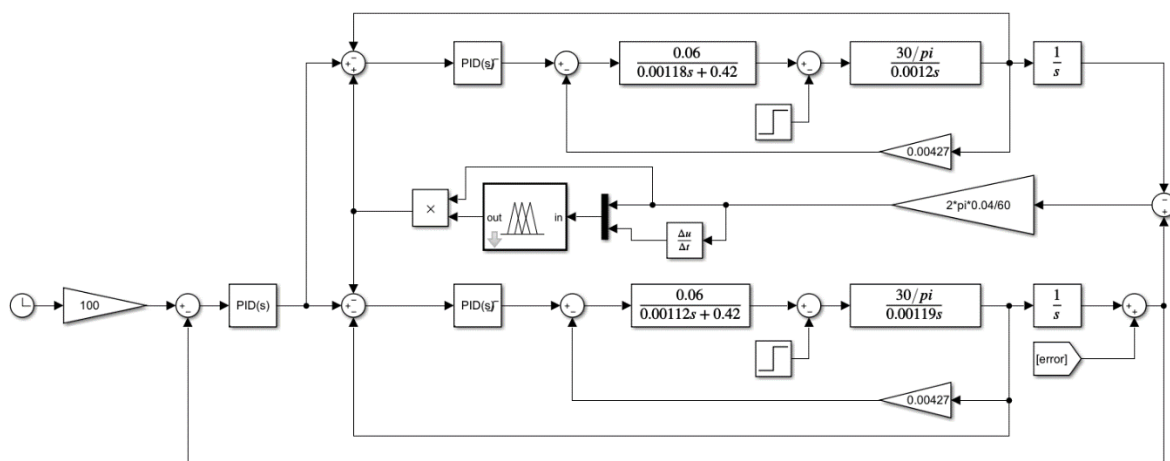


图 3.22 基于模糊控制器的交叉耦合位置同步控制仿真结构图

在 100rad/s 的斜坡位置信号的输入下,交叉耦合同步控制结构和基于模糊控制器的交叉

耦合同步控制结构的位置误差如图 3.23 所示。

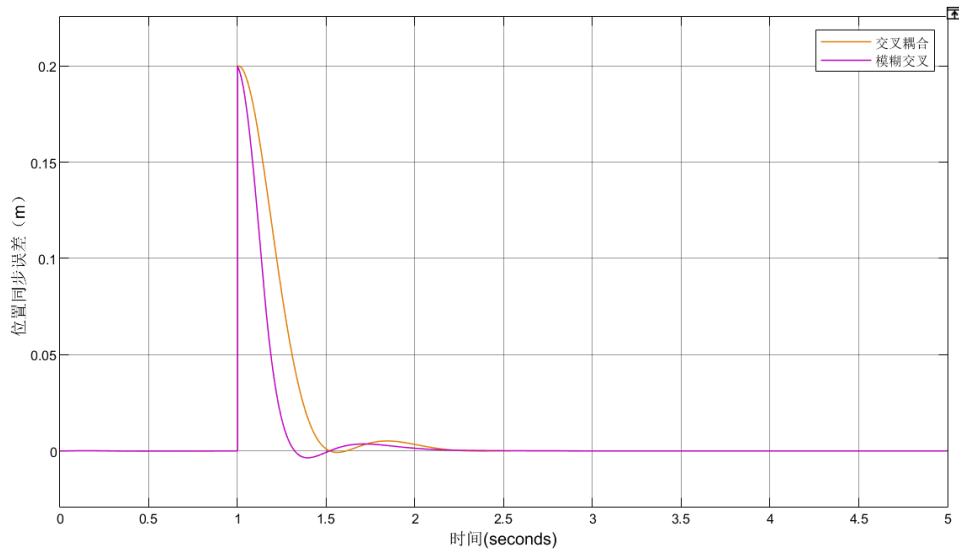


图 3.23 两种控制方式下，双电机位置误差的仿真结果对比图

根据图 3.23 可知，模糊交叉耦合相比交叉耦合控制效果得到了明显的改善，模糊交叉相比交叉耦合将响应时间减小了 0.2s 左右，同时振幅基本维持不变。这是由于模糊控制器在误差较大时采用大比例系数使得响应速度更快了；误差较小时采用小比例系数，如果误差变化很快，将采用负比例抑制超调，因此模糊交叉控制的响应时间和超调量之间的平衡性更好了，可以进一步的减少响应时间同时保证超调量基本维持不变。

综上所述，基于模糊控制器的交叉耦合同步控制策略在同步控制上具有一定的优越性，模糊控制器可以根据误差量及其变化量调整反馈补偿的比例大小，很好的平衡了系统的动态性能和稳态性能。

3.3 用于同步控制的无接触式角度传感器设计

根据上一小节的叙述，本文设计的同步控制策略属于位置同步控制策略，因此系统需要检测电机的位置信息。但是位置信息是一个难以检测的量，高精度的位置传感器成本较高，一般采用速度编码器积分的形式或者计数光电码盘的脉冲数来实现。但是这种方式存在累计误差，并不利于同步控制。考虑本文机器人使用了同步控制方式保证机器人可以笔直前进，因此双电机位置差信息获取较为重要。根据现实需求，本文设计一款无接触式角度传感器来检测机器人双电机的位置偏差。

3.3.1 无接触式角度传感器的硬件设计

霍尔效应是当电子通过一个位于磁场中的导体的时，会受到洛伦磁力的影响，磁场会给运动中的电子施加垂直于其运动方向的力促使电子发生偏转，最后在洛伦磁力与电场力的共同作用下，导体表面的电势差趋于稳定，这个电势差也被称为霍尔电压^[68]。

本系统设计的简易无接触式角度传感器是利用霍尔效应来实现的一种非接触式传感器，使用的是公司生产的 HX6659ISPO-B 霍尔传感器。该传感器通过霍尔效应感知磁场转角的变

化来获取旋转的角度值。这个磁场角度的变化量通过霍尔元器件采集，经过稳压器，放大器以及控制模块转化为模拟量的角度输出信号。

根据传感器的相关特性设计电路如图 3.24 所示。传感器的信号首先经过了四个二极管，当 A 点的电压大于 5V 时，D1 导通，这样 A 点电压就会被钳位在 5.7V，而不会继续升高；当 A 点电压低于 0V 时，D2 就会导通，A 点电压就会被钳位在 -0.7V，而不会继续降低；这样就会稳定外部的干扰。D3，D4 两个二极管是起保护作用的，确保 ‘+’ 和 ‘-’ 之间差模电压不会超过 0.7V。造成运放输入端被高差模电压击穿损坏。在此之后信号又经过了电压跟随器。因为电压跟随器拥有较高的输入电阻和较低的输出电阻这一特性，所以它对前一级电路的呈现形式为高阻态，对后一级电路的呈现形式为低阻态。电压跟随器作为中间级电路，可以有效的阻断前后级电路，避免了前后级电路的相互影响，降低 ADC 采样时的误差。

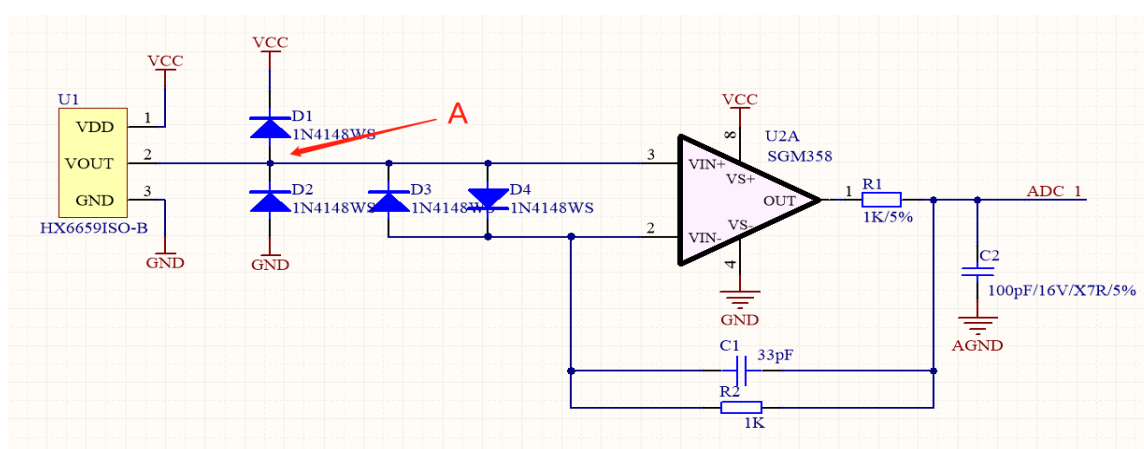


图 3.24 角度传感器原理图

3.3.2 无接触式角度传感器在光伏清洁机器人中的应用



图 3.25 角度传感器实际安装图

图 3.25 为角度传感器的实际安装环境，其中角度传感器固定于行走梁上，下面的磁铁固定于电机框架上，正中心对准角度传感器，使角度传感器的输出电压为 2.5V。当双电机运行

出现不同步时,角度传感器与磁铁之间的位置发生相对偏移,输出的电压也发生相应的变化。通过单片机的 ADC 采样后,获取到变化的值。

经过实际测试后，获得结果的如表 3.4 所示：

表 3.4 角度传感器测试表

	近端最大偏移	保持平行	远端最大偏移
单片机读数	1648-1654	1947-1952	2259-2264

由于霍尔传感器较为灵敏，所以在测试两电机的偏移量时，读数会发生小范围的跳动。

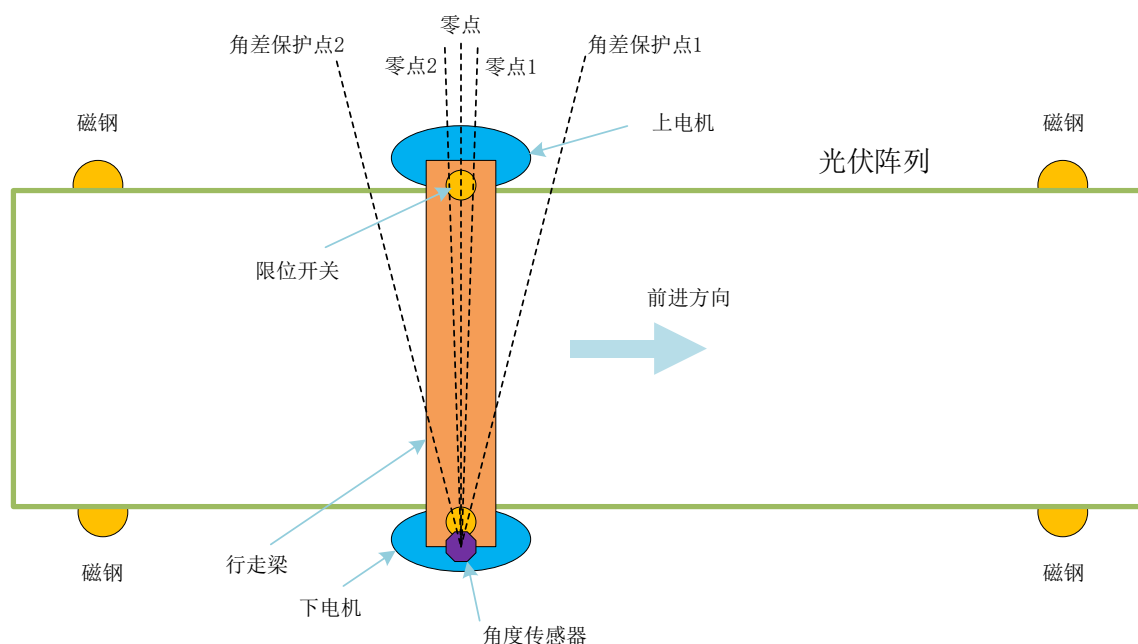


图 3.26 光伏清洁机器人运行设计图

光伏清洁机器人的整体运行图如图 3.26 所示。其中的零点就是上下电机处于同步时角度传感器的读数。由于霍尔传感器较为灵敏，即使处于同一位置不动，读数会发生小范围的跳动。因此在零点周围设置了零点 1 和零点 2。

当角度传感器读出的值在这零点 1 和零点 2 之间时，则认为此时光伏清洁机器人的上下电机处于同步状态，即行走梁保持平直状态运行。

当机器人的两个电机因为自身存在差异或者遇到外界环境干扰，角度传感器读出的上下电机偏离值处于零点 1, 2 与角差保护点 1, 2 之间时，则认为此时光伏清洁机器人的上下电机出现了偏离，需要进行位置同步控制，尽快的使行走梁保持平直状态运行。

当角度传感器读出的上下电机偏离值超出了角差保护点时，机器人会上报电机行走位差故障，并且继续尝试位置同步控制。

上下两个电机不停的在零点 1, 2 和角差保护点 1, 2 之间反复自动调整, 使行走梁基本上实现了保持在以零点为中心的零点 1, 零点 2 中间的一个窄小的区域内。若设定尽量缩小该区域, 则行走梁就会保持平直状态运行。

3.4 总体系统测试

为了验证本文中所述控制系统的性能，设计了以下实验。首先机器人启动前进模式，并通过串口打印带有时间戳的角度传感器的读数。在运行过程中，故意阻挡一个电机减慢其速度，并推动另一个电机至最大偏移处，然后松开，等待双电机重新到达同步位置，记录下这一过程的所有角度传感器数据。最后，以时间为横坐标，角度传感器读数为纵坐标绘制双电机过程中角度传感器读数曲线图，如图 3.27 所示。

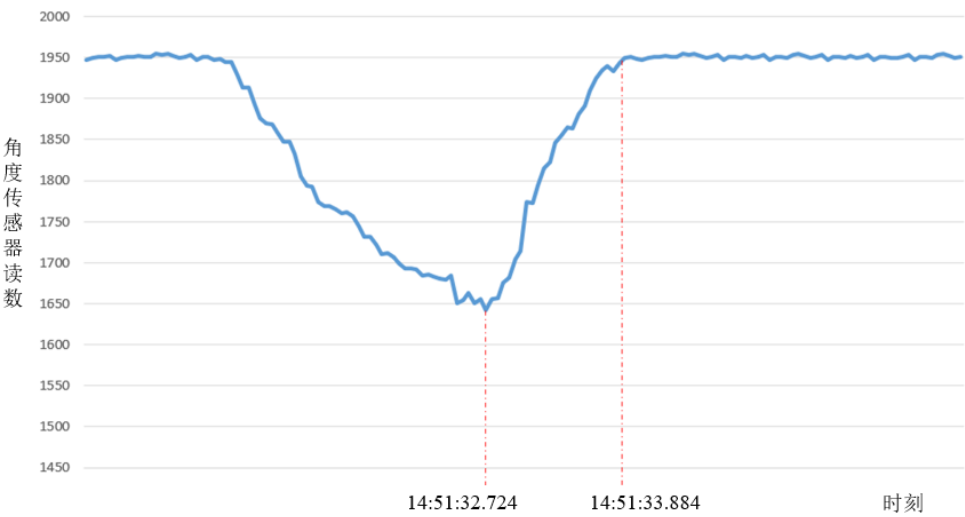


图 3.27 双电机运行过程中角度传感器的输出曲线

由图 3.27 可以看出，双电机在 14:51:32.724 时刻到达了最大偏移处，角度传感器的读数为 1650 左右，之后在 14:51:33.884 时刻，两电机恢复至同步运行状态。本控制系统从最大偏转处转同步位置，共花费了 1.16 秒，时间很短，说明了该控制系统的有效性。重复五次实验，实验结果如表 3.5 所示。

表 3.5 双电机最大偏移转至同步状态所需时间

次数	时间间隔 (s)
1	1.16
2	1.22
3	1.18
4	1.20
5	1.24
平均值	1.20

从表 3.5 可以发现，双电机在运动过程中，从最大偏移位置运行至同步状态所需时间最短为 1.16 秒，最长为 1.24 秒，五次测试的平均值为 1.20 秒，反应速度较快。测试结果较为稳定，花费时间的最大值和最小值之间相差 0.08 秒，没有出现较大的波动，证明了该系统的稳定性。

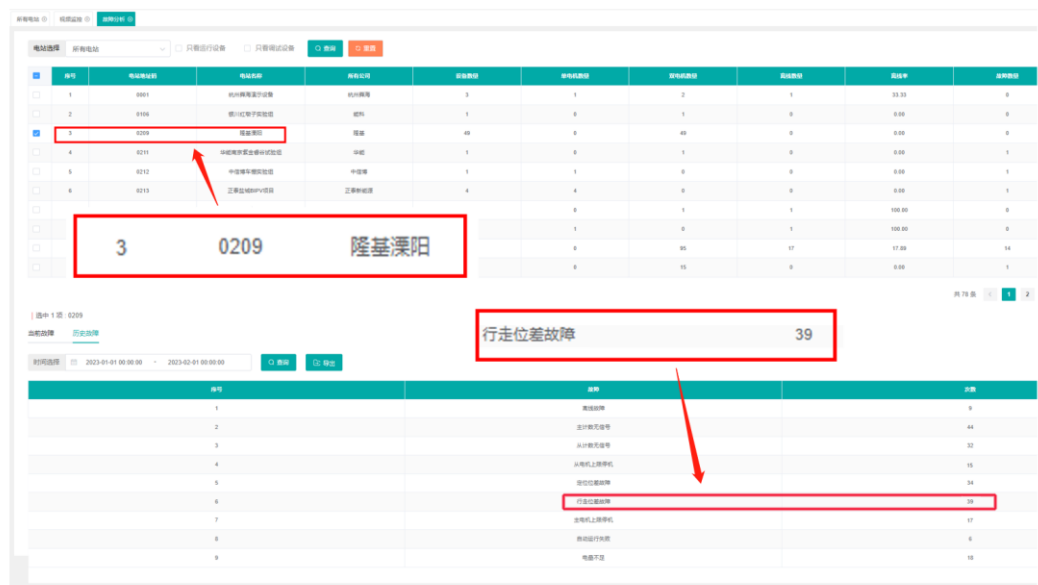


图 3.28 隆基溧阳电站光伏清洁机器人行走位差故障次数统计图



图 3.29 隆基博尚电站光伏清洁机器人行走位差故障次数统计图

为了直观的体现本设计的可靠性，本文统计了 2023 年 1 月 1 日至 2 月 1 日这一个月之间的，隆基溧阳电站 49 台光伏清洁机器人和隆基博尚电站 39 台光伏清洁机器人行走位差的故障统计。如上图 3.28 和图 3.29 所示，隆基溧阳电站使用的是改进前的双电机运行方案，其一个月之中出现行走故障多达 39 次，而隆基博尚电站使用的是改进后的双电机运行方案，其一个月之中出现的行走位差故障只有 1 次。由此可见，改进后的行走位差故障大大减少，证明了本控制系统设计的有效性。

3.5 本章小结

本文针对光伏清洁机器人行走过程中经常出现的上下电机错位，自锁这一问题，设计了基于模糊控制器的双电机协同控制的方法。通过分析直流电机以及相应的运动控制算法，建

立了上下电机的运行模型来寻找合适的控制方式，并设计了行走位移差模糊控制器来优化控制效果，最后使用线性霍尔传感器设计了无接触式角度传感器来反映上下电机的偏移差距。通过仿真实验，验证了本文所设计的行走位移差模糊控制器在常见的控制器效果中最佳。之后将本系统运用在光伏清洁机器人上进行测试，测试结果表明，在机器人运行过程中，人为给予两个电机最大位置偏差时，恢复到平稳运行状态值平均花费了 1.20 秒。最后对改进前和改进后的控制系统所在的两个电站进行一个月的行走位差故障统计，结果表明，控制系统改进后的机器人行走位差故障大幅降低。综上所述，本文所设计的基于角度传感器和模糊规则的双电机协同控制系统，能够大幅提高机器人在运行过程中的稳定性，对光伏板的清洁效果有了更好的提升，适用于集中式的光伏电站。

第4章 智能光伏清洁机器人物联网数据传输策略的设计

在物联网远程监控的项目中，设备需要与云平台保持长时间的连接，并将数据实时上报至云平台，进行数据的存储和后续相关业务的处理^[69]。在此过程中，数据每时每刻都在进行着传输，其特点是数据量小，频次较高。当设备的数量越来越多，数据的上报的量也越来越大，如何行之有效的对数据进行管理、传输至关重要。

4.1 数据传输的问题分析

在本项目的开发测试过程中，发现存在以下几个问题：

（1）实时性差。查询的设备信息为轮询方式，当设备的监控参数较多时，使得查询上报完所有监控点的时间大大增加，数据的实时性大打折扣。

（2）带宽成本高。在系统的日常使用过程中，通信模块需要与云平台保持长连接并对数据进行实时上报以达到实时监控的目的，但是这势必就会造成数据流量使用过多的问题。小数据，高频次的传输使得通信费用也越来越高。

（3）数据丢失。在具体使用过程中，本文发现网络波动的情况时有发生。当网络质量较差，甚至意外断网的情况发生时，很可能造成关键数据的丢失。

（4）远程更新稳定性。在设备已经实际投入使用的情况下，添加新的需求或者优化旧的版本代码时，需要将更新升级二进制代码包发送给通信模块。如果在升级过程中，因网络波动而导致的传输失败，又要从头传输，这不仅浪费大量时间，也会使流量产生大量浪费。

（5）存储成本高。所有上报的数据都需要存储在云平台、服务器中。数据越多，所需要存储的空间也越大，日后的维护与管理的花费也越大。

针对数据传输的优化，可以从提高数据的传输速率和尽量减少数据的传输量来进行。传输速率受网络设备性能，网络拥塞程度，带宽和协议等因素影响，从此处进行优化不仅难度极大，而且效果提升不明显。因此，本文着重从减少数据量传输方面进行考虑，通过设计监控点、连读策略、批量上报策略、断点续传等方式达到了传输优化的效果。

物联网四层模型^[70]如图 4.1 所示，边缘设备即本文设计的光伏清洁机器人的电控模块与通信模块，处于感知层和传输层。本文着重关注对边缘设备的数据传输方式进行分析，设计了智能光伏清洁机器人物联网数据传输策略来提高数据在系统中传输的稳定性和高效性。如上图所示，感知层负责采集光伏清洁机器人的设备信息，并将数据传输给传输层；传输层对采集到的数据进行整理封装，并将数据传输给平台层，并且对远程更新的方式进行了优化；平台层对数据进行暂时的存储，并提供给应用层相应的接口，通过消息队列的形式，将数据传输给应用层。通过本文的设计，不仅能降低企业的维护成本，也可以提高整个系统运行的高

效性，稳定性。

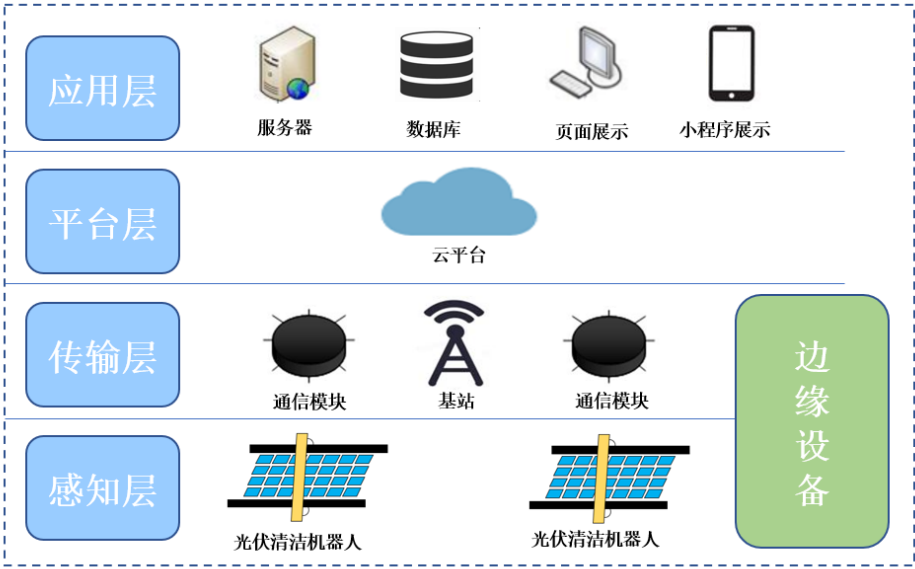


图 4.1 物理网四层模型图

4.2 基于参数监控点的感知层数据传输设计

4.2.1 参数监控点的设计

为了方便对光伏清洁机器人的相关参数进行管理，本章设计了针对管理设备的结构体和管理监测参数的监控点结构体。设备结构体信息和监控点结构体信息及关系展示如图 4.2 所示。

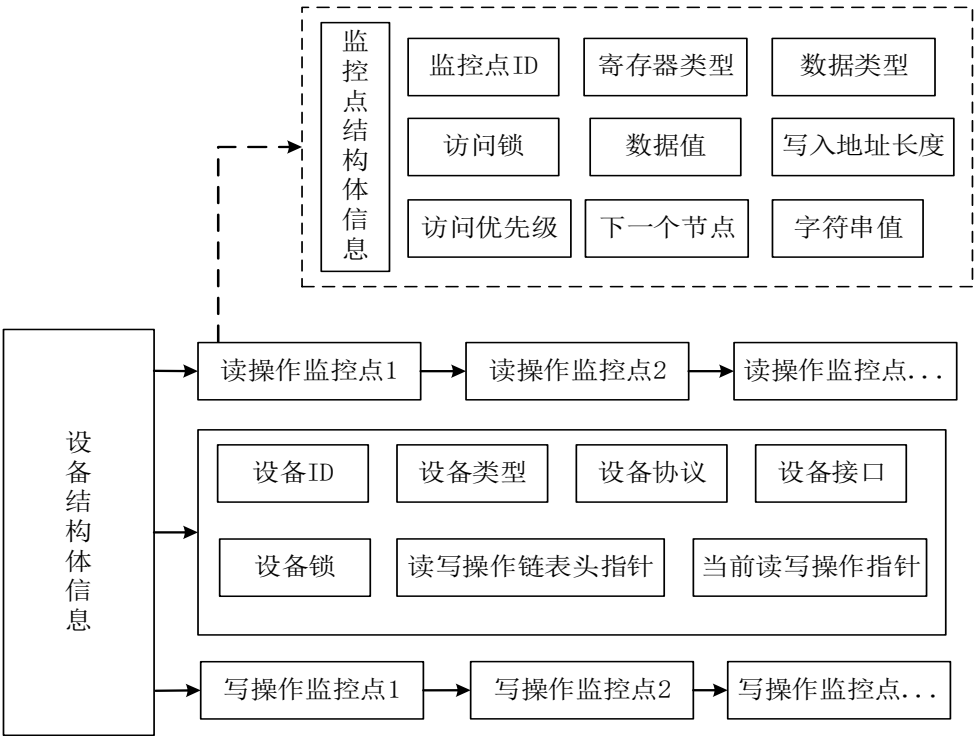


图 4.2 设备结构体信息和监控点结构体信息及关系展示图

设备结构体中包含了该设备的所有信息，例如设备 ID、设备名称、使用的串口通信方式及协议、设备在线离线状态，读写监控点链表头等。

监控点结构体包含了监测参数的所有信息，例如监控点 ID、寄存器类型，数据地址、数据长度、当前以及前一次监控点读取到的值、下一个监控点节点等信息。

为了串联设备与监控点，将设备信息、设备读监控点、设备写监控点分别存储在设备信息结构体、读操作监控点结构体、写操作监控点结构体中，对其进行链表化处理。下挂的每台设备都有一个设备信息节点与之对应，每个设备信息节点中会下挂读操作监控点链表和写操作监控点链表，分别用于存储当前读取的监控点信息和写操作监控点信息。

4.2.2 参数监控点的连读策略设计

为了方便对监控参数的管理，在给监控参数选择地址时，按照机器人基本参数信息、定时信息、电池信息、故障信息、设备基本参数信息这几个类别进行划分。随着项目的不断开发，考虑到后续方便不同类别监控参数的添加，各个不同类别之间的地址有较大的间隔，并且有些监控参数不再被需要，但是为了减少代码的改动，这些地址并不会被后续地址中的参数所填补，因此同一类别的监控参数地址也并不都是连续的。并且本系统可以通过前端来选取需要读取的监控点参数信息，对于不关注的监控点可以进行删除操作。

为了更加快速的读取监控点的信息，本章节主要利用 Modbus 的连读功能，通过设置不同的间隔，将单个寄存器数据的读取，变为读取这些间隔内所有寄存器数据。之后再将数据进行匹配，存放在相应的监控点中。通过排序，将原本不连续的地址合并，以此达到提高采集效率的目的。

如公式(4.1)所示， adr_{n-1} 表示前一个监控点地址， adr_n 表示当前监控点地址， δ 为设置的间隔阈值。首先将监控点按照地址的大小顺序进行排列， adr_n 始终大于 adr_{n-1} 。当两者的差值小于 δ 时，则认为这两个地址是连续的。

$$adr_n - adr_{n-1} \leq \delta \quad (4.1)$$

δ 值的大小决定了本设计的连读的性能，倘若 δ 的值设置过小，则需要读取的监控点地址仍然具有较高的离散性；倘若 δ 的值设置过大，则读取到的冗余数据也会变多，降低读取效率。如果没有选取一个合适的 δ 的值，通信的效率提升有限。

为了找到最合适的 δ 值，来最大限度地提高通信效率，本章对寻找最佳阈值的方法进行了设计。通过记录遍历完所有监控点所花费时间，来找到花费时间最短时的 δ 值，这个 δ 值就是最优间隔阈值。如公式(4.2)所示， t_i 表示遍历一次所有的监控点所花费时间， δ_i 设定的间隔阈值，统计 t_i 最小时所对应的 δ_i 值，最后找出 δ_i 中的最小值即为最佳间隔阈值。 δ 的取值范围为 1~127。

$$\delta = \arg \min t_i(\delta_i), \delta_i \in [1, 127] \quad (4.2)$$

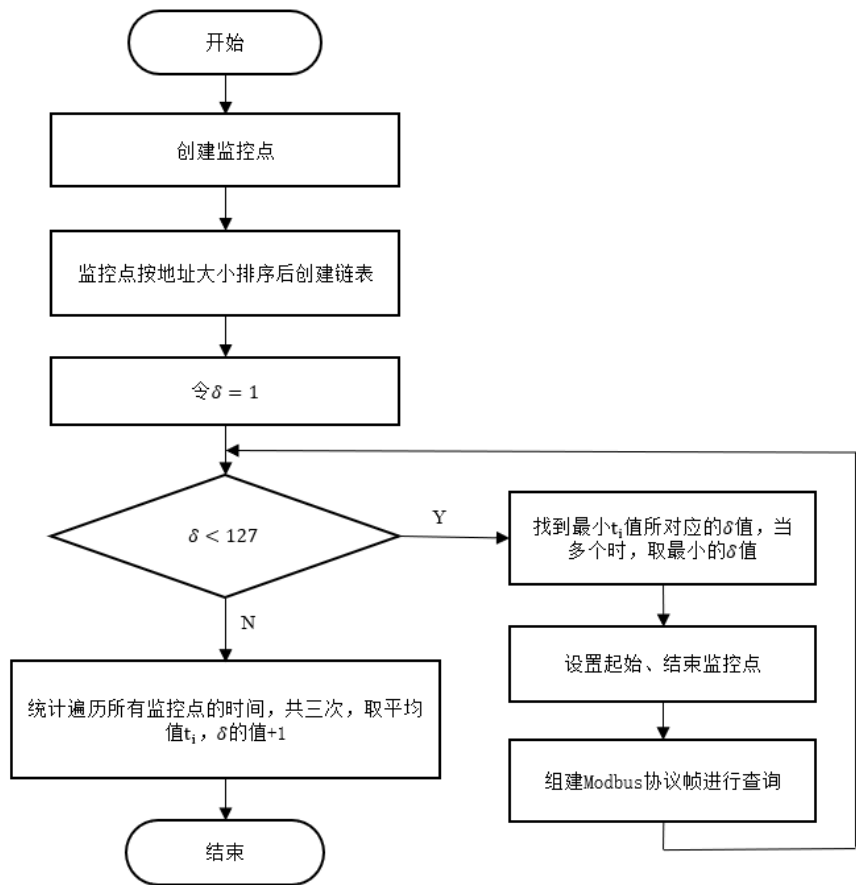


图 4.3 寻找最佳阈值的工作流程图

寻找最佳阈值的工作流程图如图 4.3 所示，具体实现步骤如下：

- (1) 在客户端选择需要添加的监控点，通过云平台转发给通信模块相应的监控点，或者直接读取通信模块中默认的监控点文件进行添加。为了便于展示，将监控点的信息简化为寄存器地址和数据域。假设添加的监控点地址为 1、6、2、5、8、12。
- (2) 通信模块按照寄存器地址的数值从小到大排序，并创建链表。如图 4.6 所示。

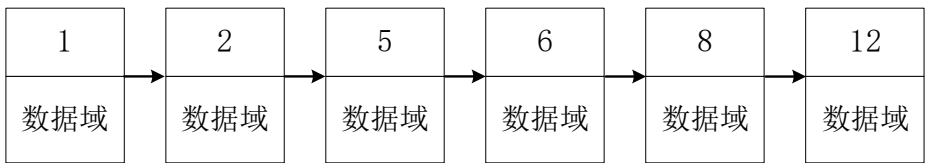


图 4.6 监控点地址位排序示意图

- (3) 设定 δ_i 的值，找到本次读取操作的起始、结束监控点。

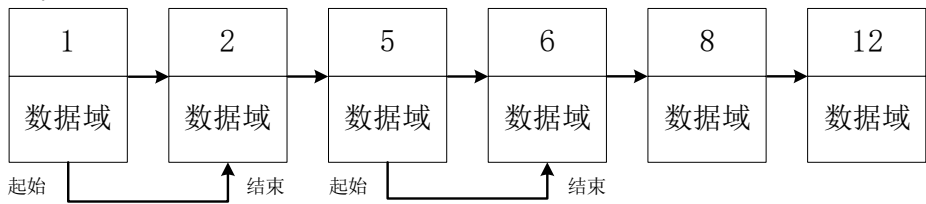


图 4.7 监控点阈值排序示意图

(4)通信模块通过将结束监控点和起始监控点的地址做差,得到需要读取寄存器的长度。以起始监控点和新得到的寄存器长度作为参数,重新组建 Modbus 数据查询帧,通过 RS485 接口发送至电控模块。当电控模块返回的数据后,通信模块再将此数据逐个匹配到监控点中的数据域当中。

(5)统计查询完所有监控点所用时间,持续三次,并计算平均所用时间 t_i 。修改 δ_i 的值,重复(3)、(4)和(5)的步骤。

(6)通过对比平均所用时间 t_i ,找到其最小值是所对应的 δ_i 值。若存在多个 t_i 相等的情况,则取 δ_i 最小的情况。

通过上述流程可以发现,若采用一个监控点读取一次的做法,则需要进行六次串口通信过程;若根据 Modbus 的连读方法,将连续的地址一起读取则需要串口通信四次;若采用本章方法,取 δ 为 4 时,所需要的串口通信次数仅需要 1 次。一帧所查询到信息的更多,大大提高了查询效率。

本系统所采集电控模块的数据在地址上是离散的。例如,地址 11 中的数据表示设定的移动速度,地址 12 中的数据表示保存设定的滚刷速度,地址 17 中的数据表示行走位差值,地址 20 中的数据表示设定的零点值,地址 21 的数据表示的是角差保护点值。通过本文所涉及的监控点连读策略,将传统方式需要经过三次串口通信才能获取全部信息,缩减为只需要进行一次串口通信就能查询完所有的数据。

4.3 基于批量上报和断网续传的传输层数据传输设计

4.3.1 数据主动批量上报策略设计

通信模块采用轮询的机制去访问光伏清洁机器人的各个监控点信息,当监控点的个数过多时,每个监控点都进行上报处理,不仅会大大的降低了信息的实时性,而且对流量的使用也会造成极大的浪费。因此,为了提高数据的实时性,减少额外流量的开支,对数据的上报可以分为差异化上报和定时上报两类,并通过将多条非紧急数据合并成一条数据进行批量上报的操作,大大减少了额外流量的开销,提高了数据的实时性。

差异化上报:将设备前后两次采集到的数据进行比较,判断是否不同;或者是否存在着故障报警等优先级高的信息。如果存在着上述情况,则通信模块需立刻将数据上报给云平台。

定时上报:在一段时间内数据没有发生变化,但是达到了规定上报数据的时间间隔,通信模块会将光伏清洁机器人的信息进行汇集,并组建相应的数据包向云平台上报数据。

批量上报:在通信模块向 OneNET 上报数据时,每一条数据单独上报,会造成许多额外的流量开销。分析一条用户数据在网络中传输的格式,如下图 4.8 所示,可以发现:以太网的首部尾部合起来有 26 个字节的额外开销;IP 首部有至少 20 个字节的额外开销;TCP 首部也有至少 20 个字节的额外开销;MQTT 首部也至少有 2 个字节的额外开销。也就是说,每有一条数据上报至云平台,就有额外的 68 个字节的开销。这部分额外开销对频繁上报数据并使用

流量计费的通信模块来说，是不可忽略的。

前同步码 8字节
以太网首部 14字节
IP首部 20字节
TCP首部 20字节
MQTT首部 2字节
用户数据
CRC校验 4字节

图 4.8 数据帧格式开销图

本章设计了用于存放数据的缓存空间，以达到减少数据在网络传输过程中的额外开销和能使重要的数据及时上报给云平台的目的。通信模块将需要上报的数据放入缓存空间中，一旦缓存空间存满或者距上一次上报已经超过规定的时间，则通信模块会将缓存空间内的所有数据打包封装成一条数据帧上传至云平台。具体流程如图 4.9 所示：

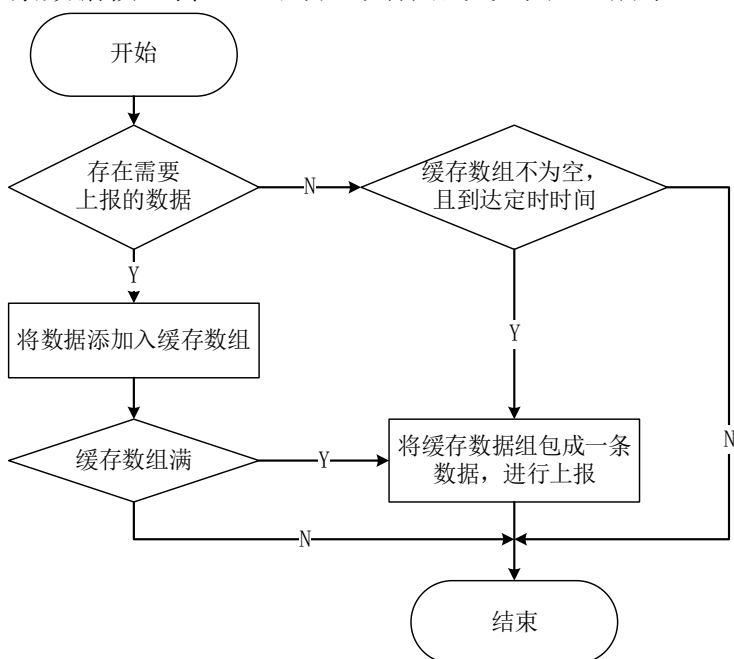


图 4.9 缓存数据处理流程图

通信模块将多条数据合并在一起后进行批量上报，相较于一条数据单独上报，大大减少了网络传输过程中各协议封装的数据开销，达到了节省物联网卡流量费用的目的。

4.3.2 数据断网续传策略设计

由于光伏清洁机器人设备部署于山区荒漠等条件较为恶劣的地区，网络信号很容易出现

波动，这会导致设备可能处于离线状态，并且采集的数据也有会丢失。这部分数据可能就是分析定位光伏清洁机器人为何出现异常的关键数据。为了使离线设备尽快连上网络，保证数据的真实可靠，增强数据采集的稳定性，采用错峰重连策略使设备有序连网，避免拥堵；采用 NTP 时间网络协议同步通信模块与云平台的时间^[71-72]，并设计相应的缓存队列存储离线时的重要数据，待网络恢复正常时可以继续上报。

4.3.2.1 设备离线错峰重连策略

通信模块与云平台建立连接后，在没有数据传输的情况下，通信模块会以 1 分钟的间隔不断向云平台发送心跳帧，云平台收到通信模块的任何信息都会给予相应的回复。并且通信模块会统计 2 分钟内的接收帧的数量，并检测数量是否发生变化，若有变化则说明当前网络连接正常；若没有，则说明通信模块已经离线，无法与云平台进行数据交互。云平台长时间未接收到通信模块上报的数据帧，也会自动断开与通信模块的连接。倘若出现离线断网的问题，通信模块将会重新进行联网操作，并与云平台建立连接。本系统的离线检测机制可以在 2 分钟内判断通信模块的网络连接状态，重新联网并与云平台建立通信的流程在 10 秒以内。

当大量设备同时重启，或者断网重连时，4G 附着基站网络的步骤将会对基站造成严重的负担，导致 4G 模块无法联网成功，若没有一个重启的机制，则大量的通信模块在持续进行联网操作，大大降低了联网概率，延长了联网时间，为此设计了一个错峰联网的机制十分有必要。由于每个物联网网卡都有自己第一无二的 IMEI 码，因此，通过读取设备 IMEI 码的后几位来确定重连时间，可以有效避免联网时的拥堵现象。具体步骤如图 4.10 所示：

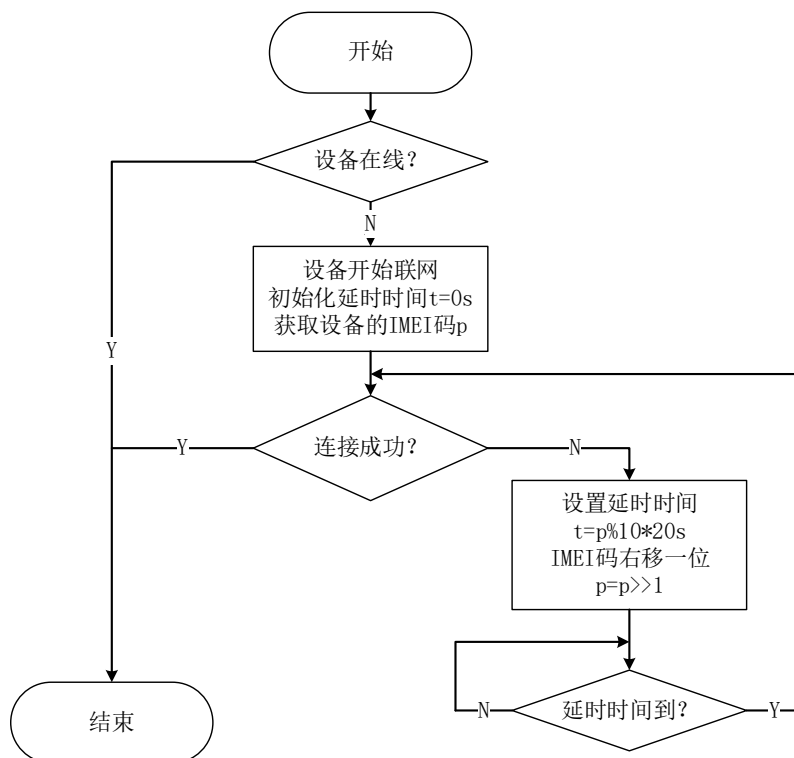


图 4.10 设备错峰重连的工作流程图

当设备刚离线时，立即进行联网操作。倘若连接失败，将设备的 IMEI 码最后一位乘上 20s 作为下一次重连的等待时间。倘若下一次重连继续失败，则选取 IMEI 码的倒数第二位乘上 20s 作为下一次重连的等待时间。按照本章的错峰重启设计，4G 模块的联网冲突概率大大降低。

4.3.2.2 NTP 时间同步机制

NTP 时间同步是将网络中各个设备的时间进行同步。

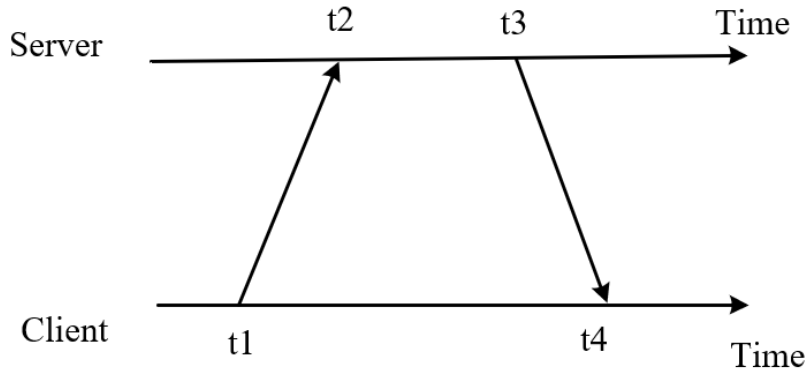


图 4.11 NTP 同步原理图

结合图 4.11 所示的 NTP 同步原理，NTP 时间同步具体步骤如下所示：

- (1) 客户端向 NTP 服务器发送请求时间同步的报文，其中包含了离开客户端的时间戳 t_1 ；
- (2) 请求时间同步报文到达 NTP 服务器时，记录此时的时刻为 t_2 。当 NTP 服务器处理完成此报文后，在 t_3 时刻发出应答报文返回给客户端。该应答报文中含有客户端发送请求报文的时间戳 t_1 、NTP 服务器接收到报文的时间戳 t_2 、NTP 服务器发送给客户端应答的时间戳 t_3 ；
- (3) 客户端在接收到来自 NTP 服务器的响应报文时，记录此时刻的时间戳 t_4 。
- (4) NTP 报文从客户端到服务器的往返延迟 $delay$ 。

$$delay = (t_4 - t_1) - (t_3 - t_2) \quad (4.3)$$

- (5) 客户端与服务端之间的时间差 $offset$ 。

$$\begin{cases} t_2 = t_1 + offset + \frac{delay}{2} \\ t_4 = t_3 - offset + \frac{delay}{2} \end{cases} \quad (4.4)$$

最终获得时间差 $offset$ 为：

$$offset = \frac{(t_2 - t_1) + (t_3 - t_4)}{2} \quad (4.5)$$

本文通信模块通过 Cat.1 模组连接到网络中，通过解析包含 NTP 服务器域名的 DNS 文件，进行时间同步。具体的流程图如 4.12 所示：

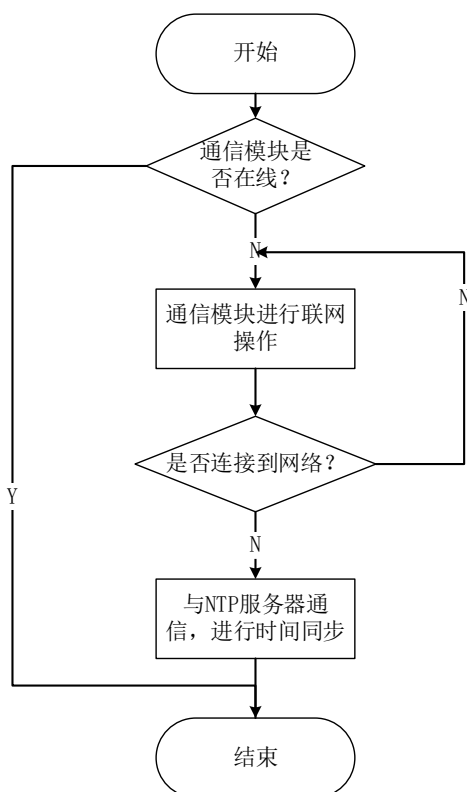


图 4.12 基于 NTP 的时间同步机制的工作流程图

4.3.2.3 离线缓存队列

当通信模块设备完成时间同步后，才会开始与光伏清洁机器人进行通信，采集相应数据，同时生成离线缓存队列。当通信模块正常联网时，不会往此队列内塞入数据。一旦设备出现断网，则将重要的参数信息存入该离线队列中。一旦队列长度超过设定的数量时（说明离线时间较长），则会删除头部数据，队列尾部继续插入新生成的数据，这样可以避免内存溢出的问题。

结合上述的 NTP 时间同步机制，离线缓存队列中的数据格式如图 4.13 所示：

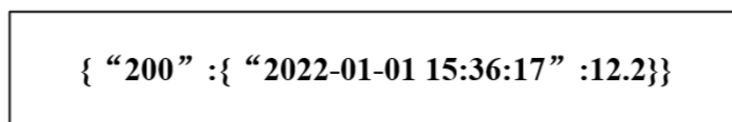


图 4.13 离线存储数据格式图

这行内容表示，200 这个监控点上的数据，在 2022 年 1 月 1 日 15 点 36 分 17 秒时产生的数据为 12.2。当通信模块离线时，设备还在采集数据，通信模块将这些数据存入缓存队列中，此时通信模块一直在进行联网尝试。当重新联网成功后，通信模块继续将缓存的数据进行上报。由于上报的数据中包含有时间戳，所以云平台在处理数据时，会根据数据携带的时

间戳进行保存，不会出现数据丢失或混乱的问题。

4.3.3 基于断点续传的远程升级策略设计

设备部署完成后，往往会出现之前测试环境下不曾出现的问题，或者在实际实行过程发现新的需求点。因此，需要对设备进行不定期的更新升级必不可少。常见的更新升级方式是安排运维人员前往设备所在地对设备进行手动升级或者直接替换设备，这就需要耗费大量的人力物力，不仅浪费时间，还增加了企业的运维成本。为了使运维人员操作更便利、系统能更快速地进行更新，本文设计了通过远程更新进行设备的程序升级策略。

由于本系统部署在环境较为恶劣的野外，通信模块在进行下载更新文件时可能会遇到各种各样的问题，例如设备断电、突然死机、网络波动等。这些情况就会导致通信模块与服务器的连接断开，从而使更新文件下载失败，需要重新从头开始下载。一个更新文件大概在几百 k 左右，这对使用流量计费的物联网卡来说，占用了较多的流量资源。为此，将已下载的部分更新文件进行保存，从断点处开始继续下载，最终将多个片段的更新文件进行组合成完整的更新文件，对本项目来说十分必要。

4.3.3.1 普通的 HTTP 远程更新文件下载机制

如图 4.14 所示，将最新版本号更新代码的二进制文件，放置在华为云服务器上。运维人员在客户端选定需要更新的设备点击更新按钮。通过 OneNET 云平台将需要远程更新的指令发送给通信模块，告知通信模块更新代码的版本号、存放具体文件的 URL 地址和文件在 MD5 校验方式下的校验值。通信模块使用 HTTP 协议与华为云的服务器进行链接，将需要更新的代码下载到本地，以文件的方式进行存储。下载完成之后调用 MD5 计算方式对本地更新文件二进制值进行计算。若计算的结果与下发的指令中所给的校验值一致，则上报 OneNET 平台，更新文件已下载成功；若结果不一致，则将更新文件下载失败的信息上报给云平台，模块不会进行更新操作。使用此更新文件下载方式的过程中，要求在网络状态较好的情况下进行。

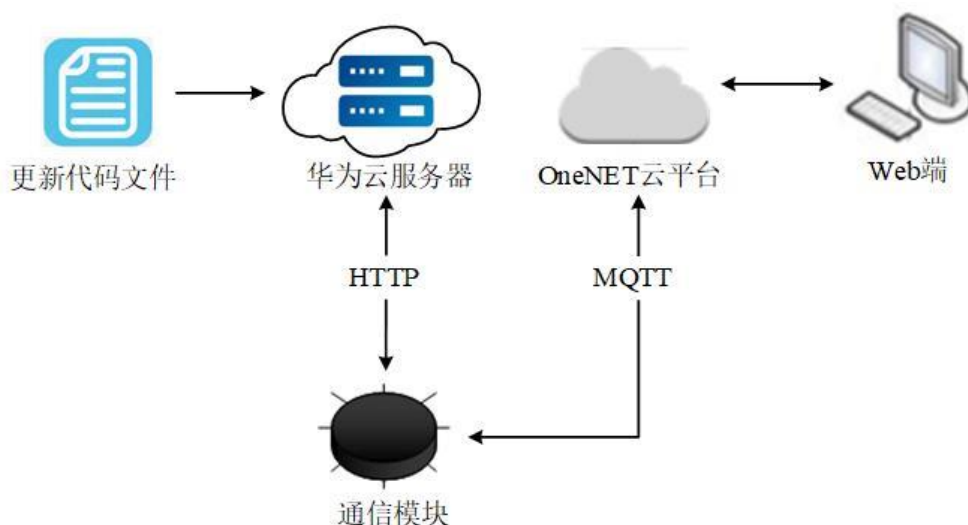


图 4.14 普通的 HTTP 更新文件下载机制图

4.3.3.2 基于断点续传的远程更新文件下载机制

断点续传就是可以在接收文件处设置断点位置，倘若在更新文件传输过程中出现网络波动，导致下载更新文件中断，则请求新的更新文件片段可以从断点位置开始下载。普通文件的下载和断点续传文件的下载最主要区别是它们发送 HTTP 请求报文头不同。服务器通过对报文请求头的解析,对不同的请求进行相应的回复。断点续传报文的请求头多了 Range 字段，这是说明通信模块需要获得更新文件的字节范围。当服务器解析 HTTP 协议发现报文请求头中 Range 字段时，会截取所需的更新文件字段发送给通信模块。具体流程如图 4.15 所示。

整个更新文件下载的流程所给予的时间最多为五分钟，当超过五分钟时，则认为当次远程更新文件下载失败。

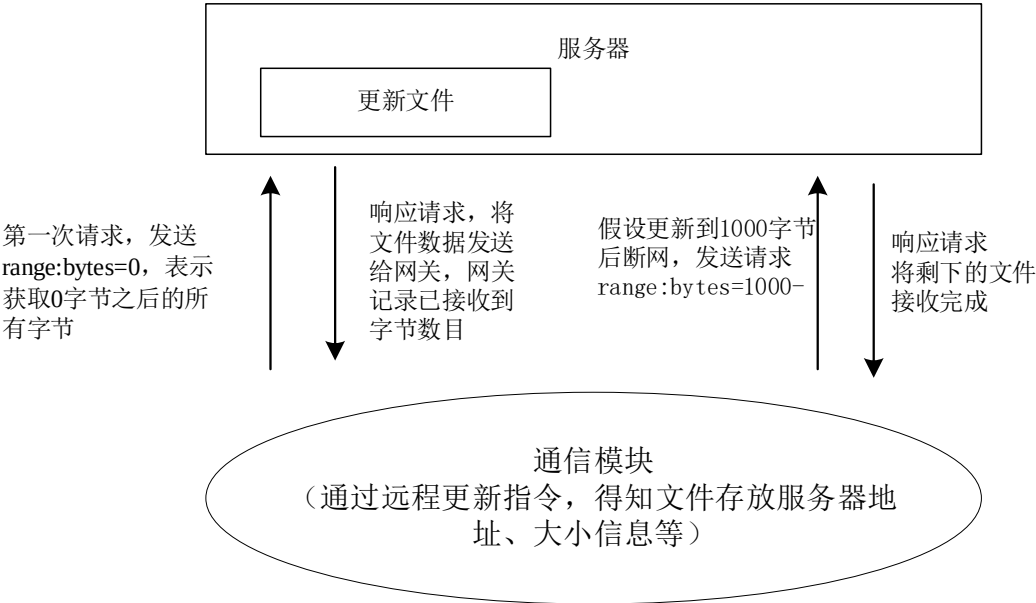


图 4.15 断点续传方式的文件下载图

4.3.3.3 设备更新机制

程序的远程更新分为通信模块部分和电控模块部分。通信模块在接收到平台下发的远程更新指令后，首先判断此次更新的目标是通信模块代码还是电控模块代码。之后通过解析指令中的 URL 地址获取服务器地址，以断点续传的方式，向服务器请求更新文件的远程下载，在文件通过 MD5 校验后，并将更新的二进制文件存放于本地文件系统中。

倘若指令解析后发现是通信模块代码的更新，在下载完成后会修改通信模块芯片 Flash 的更新标记位并重启。系统再次开机时，通过判断 Flash 的远程更新标记位来决定是否将本地更新文件中的代码覆盖掉之前的旧版本代码，替换完成后表示远程更新结束。

倘若指令解析后发现是电控模块代码的更新，则通信模块在更新代码全部下载完成后，通过自有协议向电控模块传输更新的二进制代码。在更新代码传输完成后，电控模块修改 Flash 中的更新标志位并重启。电控模块板代码的 Flash 主要分为两部分，一部分是当前运行代码区，另一部分是更新代码区。系统重启后首先进入 BootLoader 区，判断 Flash 中的更新

标志位，若是需要更新，则将启动代码的入口改为更新代码区的地址。倘若发现更新代码区多次无法启动，则将启动代码的入口重新改为当前运行代码区并上报故障信息。这样不覆盖源代码的举措，使得更新代码失败时，光伏清洁机器人仍然能按照原版本代码进行清洁任务。远程更新整体流程如图 4.16 所示。

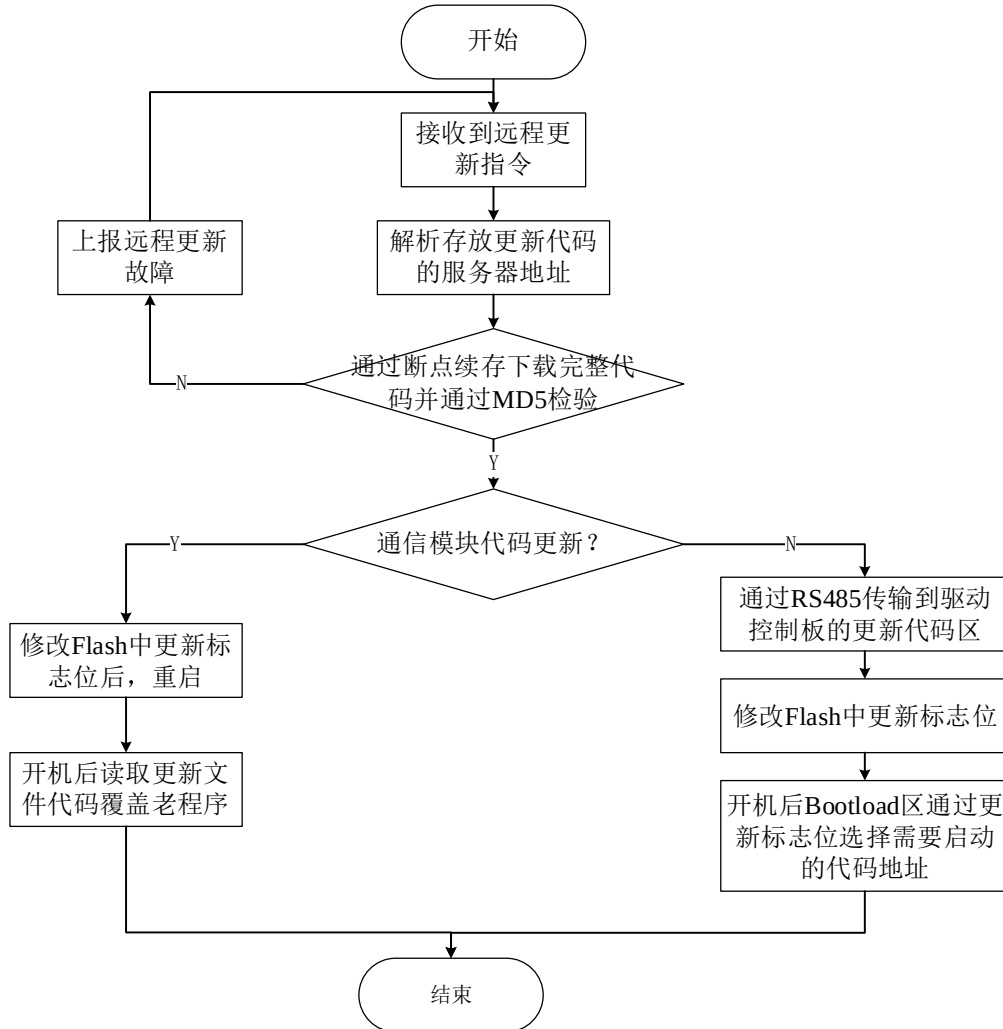


图 4.16 远程更新整体流程示意图

4.4 基于消息队列的平台层与应用层数据传输设计

消息队列（Message Queue，MQ）运用于云平台于应用层之间的数据传输^[73-74]，属于消息中间件服务，具有低时延、高并发、高可用的特点。如下图所示，消息队列的工作机制中存在着生产者、物联网套件、消息队列、消费者这几个模型。生产者对应光伏清洁机器人设备，物理网套件对应联网链路中的通信模块，基站等设备，消费者对应具体业务。生产者将生产的数据发送到物理网套件中，物联网套件根据约定的规则将数据发送到相对应的消息队列中。这时，消费者就已经结束了对数据的处理。消费者不断监听着自己绑定的消息队列，一旦有消息通知，立刻将其中的消息取出进行业务处理。生产者将消息发送给消息队列后，与其相关的所有消费者会获得消息通知，存在着一对多的关系。利用消息队列的松耦合特性，

可以有效降低系统的工作压力。消息队列的工作原理如图 4.17 所示。

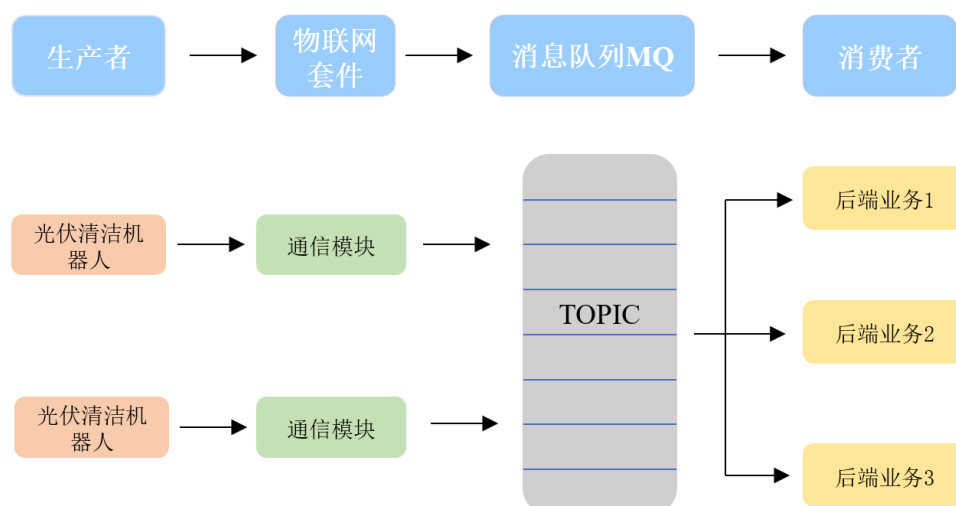


图 4.17 消息队列的工作原理图

消息队列的特点：

（1）解耦机制。使用消息队列可以降低系统之间的耦合度，生产者与消费者之间并没有直接的联系，当其中一方出现问题对另一方不产生直接影响。生产者将消息发送到消息队列后就结束了对这条消息的管理，继续做自己接下去的流程。消费者在接收到消息后，也不需要向生产者返回确认信息，只需关注消息所代表的信息，执行相应的流程。

（2）实时数据推送。在光伏清洁机器人设备状态监控的过程中，设备上报的状态/消息需要及时通知到应用层，消息队列提供高效数据通道，实现快速的端到端实时数据同步，为应用层获取设备消息提供高速数据通道。

（3）消息分发。在很多应用场景中，相同的设备消息需要被分发至不同的应用服务进行不同的业务处理，消息队列提供消息共享与分发的消息池，供多方应用独立消费。并且支持一对多消费模式，消息可以被灵活的分发至一个或者多个消费者。

（4）削峰去谷。面对网络信号突然中断一段时间后又恢复的情况，通信模块会用断网续传的策略，集中、大量的上报数据，此时，会出现短期较为明显的业务波峰。消息队列可以缓冲业务波峰，减少应用系统压力，帮助系统减少应用端资源规模需求，确保消费端业务平稳运行，从而削减投入成本。

4.5 实验测试与结果分析

4.5.1 数据离线续传性能测试

为了验证数据离线续传功能的性能，本测试将使用 Modbus Slave 软件模拟光伏清洁机器人电控模块与通信模块进行通信，每 10s 采集一次数据。在其中的某一段时间进行断网处理，同时观察这段时期采集的数据能否保存到缓存队列中；当连接上网络后，查看离线采集的数据能否正常上报至 OneNET 云平台。

如图 4.18 所示, 在晚上 21 点 26 分 06 秒的时候进行断网处理, 在 21 点 30 分 36 秒时恢复与网络的连接, 查看打印信息离线数据是否存储到了离线队列中, 并观察离线队列数量情况。可以看到, 数据每 10s 采集一次, 采集到之后直接存入离线队列中。

Index	Received	Tick	Level	Description
57071	21:36:45...	4017	ASMS/I	804E2245
57072	21:36:45...	4017	ASMS/I	shane: at_hex2ascii
57073	21:36:45...	4018	ASMS/I	shane: return size = 20
57074	21:36:45...	4018	ASMS/I	80A599A0
57075	21:36:45...	4018	ASMS/I	picCID1 +89860621240012388239
57076	21:36:45...	4018	ASMS/I	AT CMD2 info text len=20: 89860621240012388239
57077	21:36:45...	4018	ATEN/I	AT LUAT write: len=24
57078	21:36:45...	4019	ATEN/I	vat_resp_callback VAT< (24)89860621240012388239
57079	21:36:45...	4020	OPEN/	AT CMD2 OK
57080	21:36:45...	4022	ATEN/I	AT LUAT write: len=6
57081	21:36:45...	4022	ATEN/I	vat_resp_callback VAT< (6)OK
57082	21:36:45...	4023	ATEN/I	DRV URT1 receive 600, got 0
57083	21:36:45...	4024	OPEN/	DRV URT1 receive 600, got 0
57084	21:36:45...	4027	DRV/R/D	DRV URT1 receive 600, got 0
57085	21:36:45...	4981	DRV/R/D	DRV URT1 receive 600, got 0
57086	21:36:46...	5963	DRV/R/D	DRV URT1 receive 600, got 0
57087	21:36:46...	6946	DRV/R/D	DRV URT1 receive 600, got 0
57088	21:36:46...	7929	DRV/R/D	DRV URT1 receive 600, got 0

Index	Received	Tick	Level	Description
27024	21:26:06...	20385	OPEN/	[Net_test] Network outline [21:26:6]
27025	21:26:06...	20386	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[0]
27496	21:26:16...	53153	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[1]
27947	21:26:26...	20385	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[2]
28418	21:26:36...	53153	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[3]
28894	21:26:46...	20385	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[4]
29398	21:26:56...	53152	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[5]
29849	21:27:06...	20384	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[6]
30320	21:27:16...	53153	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[7]
30809	21:27:26...	20385	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[8]
31260	21:27:36...	53153	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[9]
31754	21:27:46...	20385	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[10]
32318	21:27:56...	53153	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[11]
32769	21:28:06...	20385	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[12]
33240	21:28:16...	53153	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[13]
33691	21:28:26...	20386	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[14]
34142	21:28:36...	53153	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[15]
34595	21:28:46...	20385	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[16]
35046	21:28:56...	53153	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[17]
35507	21:29:06...	20385	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[18]
35963	21:29:16...	53153	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[19]
36424	21:29:26...	20385	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[20]
36885	21:29:36...	53153	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[21]
37341	21:29:46...	20385	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[22]
37797	21:29:56...	53153	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[23]
38268	21:30:06...	20385	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[24]
38749	21:30:16...	53153	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[25]
39235	21:30:26...	20385	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[26]
39729	21:30:36...	53153	OPEN/	[Net_test](char*)Device_offline_data_save[27]
39730	21:30:36...	53154	OPEN/	[Net_test] Network connect success [21:30:36]

图 4.18 通信模块的串口打印信息图

当设备连接上网络后, 观察云平台上某监控点的数值。如图 4.19 所示, 可以看到, 在 21 点 26 分 06 秒至 21 点 30 分 36 秒时, 所有的数据全部上报, 没有出现丢失的情况, 证明了该设计的有效性。

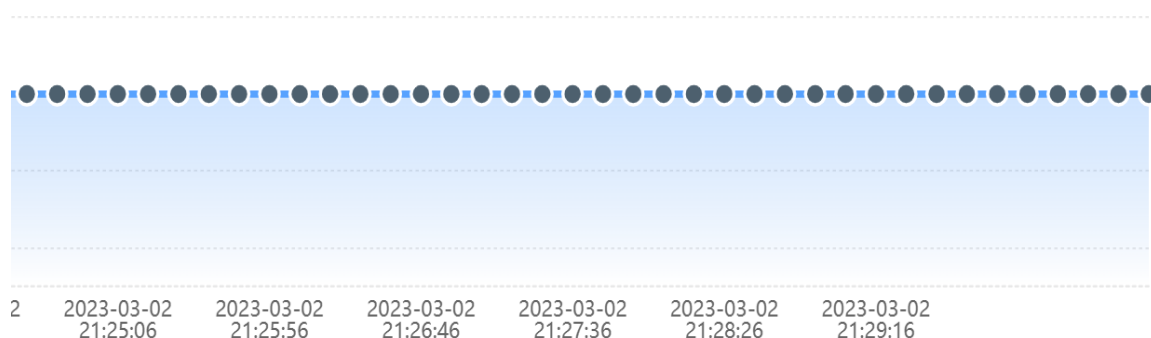


图 4.19 云平台上监控点数据值图

当未添加外部 Flash 模块时, 对光伏清洁机器人进行离线数据上传测试, 记录下缓存队列存满时所用的时间。一共进行五次, 以此来反映本系统所能存储的最大离线数据时间。

表 4.1 设备离线时的数据存储时长

次数	时间间隔
1	13 分 36 秒
2	12 分 18 秒
3	12 分 54 秒
4	13 分 03 秒
5	13 分 39 秒
平均值	13 分 06 秒

通过表格 4.1 可以发现，本系统所能存储的最大离线数据时间至少为 12 分钟。一般情况下，当网络出现波动，设备离线重连所花费的时间只需要十几秒，数据并不会出现丢失的情况，提高了系统数据的准确性。极端情况下，当通信模块长时间连不上网络，但需要存储所有信息时，可以通过外接 EEPORM 进行存储。

4.5.2 远程更新性能测试

为了验证基于断点续传的远程更新性能，将其与普通的 HTTP 下载更新文件的方式作对比。通过通信模块更新的监控点状态信息，来判断当前下载是否成功，根据状态变化的时间戳来判断整个下载更新文件成功时所花费的时间，如 4.20 所示。

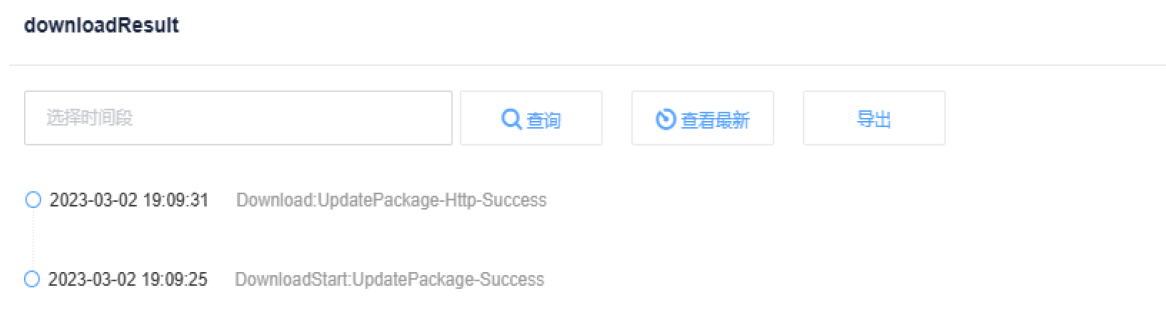


图 4.20 OneNET 上远程更新开始、结束标志展示图

如图 4.21 所示，通信模块通过接天线与不接天线来模拟网络质量的好坏。



图 4.21 接天线与不接天线时的通信模块图

本测试所用的新的远程更新文件大小为 318K，版本号高于通信模块代码本地版本号。两

种更新方式分别测试三台设备。第一次测试为在下载更新文件过程中，通信模块一直连接着天线，模拟较好的网络情况；第二次测试为在下载更新文件过程中，通信模块拔掉天线后又接上，模拟网络出现波动的情况；第三次测试为在下载更新文件过程中，通信模块不接天线，模拟网络环境差的情况。记录相应的传输时间和成功率。

表 4.2 网络条件好时远程更新测试结果

测试次数	普通 HTTP 下载方式		断点续传下载方式	
	时间(s)	成功率	时间(s)	成功率
1	6	100%	6	100%
2	7	100%	6	100%
3	6	100%	6	100%
平均	6.3	100%	6	100%

表 4.3 网络条件出现波动时远程更新测试结果

测试次数	普通 HTTP 下载方式		断点续传下载方式	
	时间(s)	成功率	时间(s)	成功率
1	24	100%	21	100%
2	29	100%	22	100%
3	26	100%	21	100%
平均	26.3	100%	21.3	100%

表 4.4 网络条件较差时远程更新测试结果

测试次数	普通 HTTP 下载方式		断点续传下载方式	
	时间(s)	成功率	时间(s)	成功率
1	---	0%	76	100%
2	---	0%	98	100%
3	---	0%	57	100%
平均	---	0%	77	100%

如表 4.2 所示，当通信模块接上天线，网络条件较好时，程序下载更新文件成功率和所消耗的时间都是一致的。如表 4.3 所示，当通信模块在更新过程中，拔掉天线又接上后，程序的下载更新文件成功率最终都是 100%，但是普通的 HTTP 的下载方式所消耗的时间全部多于采用断点续传的下载方式。其原因是普通更新文件下载中断后，并不会保存之前的文件，而是重新从头请求更新文件，使用断点续传的下载方式能使断网前请求到的文件数据进行保存，当重新连上网络后，能继续下载后续文件。如表 4.4 所示，当设备断网后，下载的更新文件从头开始，所以普通的 HTTP 的下载方式所消耗的时间有较大变化，而断点续传的下载方式由于可以从断点处继续请求文件，并不需要从头全部下载的机制，所以不受影响。当通信模块不接天线时，网络信号质量差，普通的 HTTP 文件下载成功率为 0，而断点续传的文件下载方式的成功率任为 100%，虽然消耗了大量时间，但其下载文件的稳定性有较大的保证。

上述实验充分说明了在进行远程更新文件下载的时候选择使用断点续传的方式，可以提

高远程更新在网络环境较差情况下的成功率，减少传输所需时间以及减少从头下载更新文件的流量资费。

4.5.3 数据传输流量测试

为了验证本文所提出的物联数据传输策略对数据传输流量的优化情况，本次测试使用两台通信模块设备，一台使用普通的透传策略，即对数据不做处理，直接上报至云平台；另一台则使用本系统的数据处理策略，对数据进行整合优化处理后再上报至云平台。为了更好的对两种方式的传输数据流量作对比，本测试使用的是 Modbus Slave 软件模拟光伏清洁机器人设备，排除因具体设备的不同可能造成的干扰。上报的数据包括只上报一次的代码版本号，Cat.1 模组的 IMEI 码信息等、10s 上报一次的监控点数据、1 分钟上报一次的心跳帧、3 分钟上报一次的 RSSI 信号强度等。两台通信模块设备在相同的网络情况下进行测试，时间持续 8 小时，从 2 月 9 号到 2 月 13 号连着测试五天。每天通过物联网智能管理平台，查询物联网卡路流量的实际使用情况，记录流量的消耗情况。图 4.22 为查询流量的物联网卡的平台界面。

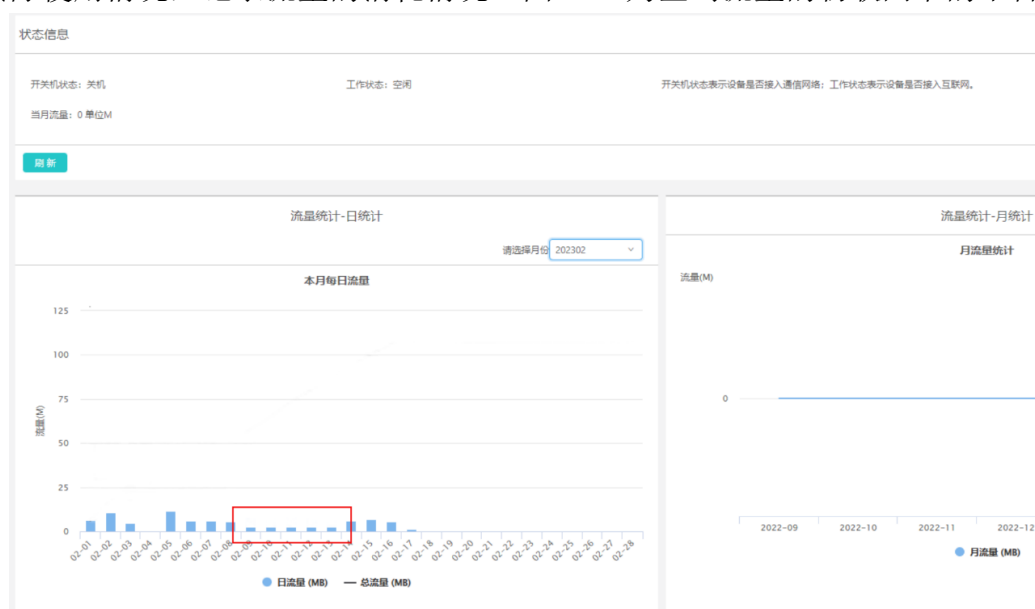


图 4.22 物联网卡查询流量图

表 4.5 两种不同方式下数据传输量测试结果

测试时间(天)	透传策略数据量使用大小(M)	本章策略下数据量大小(M)
第一天	16.426	2.142
第二天	16.745	2.215
第三天	16.356	2.179
第四天	16.567	2.132
第五天	16.499	2.153
平均值	16.519	2.164

从上表 4.5 中可以看出，由于 Modbus Slave 软件的数据较为固定，传输的数据大部分都是按规律传输的，所以数据流量也变化不大。本文提出的物联数据传输策略的优化设计，五

天中的平均数据量为 16.519M，常规的透传模式下五天的平均数据传输量为 2.164M。由此可见，本章所设计数据传输策略在降低数据传输量，节省物联网卡流量方面具有显著效果。与传统的透传模式相比，数据的传输量降低了 86.8%。这是在物联数据传输策略中多种数据传输策略的共同作用下达到的效果。数据主动上报策略对数据进行分类，定时、差异化上报减少了数据上报云平台的次数；批量上报策略减少了数据在上报云平台的过程中，因组包、校验等带来的流量开销。

综上所述，本章所设计的智能光伏清洁机器人物联数据传输策略在边缘端对数据进行处理，减少了大量重复数据的上报，不仅可以有效节省物联网卡的流量费用，还可以给服务器减轻负担，降低企业的维护成本。

4.5.4 稳定性测试

为了验证智能光伏清洁机器人控制系统能否长时间稳定的提供服务进行测试。本文在工厂部署了一台设备，如下图所示。每天登陆客户端浏览器，查询机器人的相关信息；下发 100 次命令，包括修改相关参数和控制光伏清洁机器人进行清扫活动，查看是否能在设备端执行成功；设备的离线情况，故障信息。整个测试周期持续 7 天，记录下每天下发的指令是否得到执行，设备有无离线，故障信息，数据通信是否存在异常等情况。



图 4.23 工厂实际测试环境图

获得的实际测试结果表 4.6 所示。

表 4.6 系统七天稳定性测试结果

时间	离线次数	指令执行成功率	故障信息	数据通信异常
第一天	0	100%	---	0
第二天	0	100%	---	0
第三天	0	100%	---	0
第四天	0	100%	---	0
第五天	0	100%	电压不足	0
第六天	0	100%	---	0
第七天	0	100%	---	0

在七天的较高强度测试中，通过查看客户端数据，OneNET 信息和光伏清洁机器人实际的运行情况可以发现，本系统运行十分稳定。在第五天的时候，上报了电池电压不足的故障警报，原因是由于测试时间过长，蓄电池未充电且该设备放置于厂房内，阳光较差，机器人自带的光伏板发电效率较低导致的蓄电池电压不足。在给蓄电池充电之后，该故障警报消失。通过此次测试说明，本文所设计的智能光伏清洁机器人系统，可以长时间自动稳定运行，符合项目的要求。

4.6 本章小结

本章针对数据在光伏清洁机器人控制系统中的传输过程进行了分析，对整个系统的稳定性、效率性、减少数据传输过程中不必要的损耗等方面进行考虑设计。通过对本系统的边缘设备所在的感知层，传输层，进行相应优化与设计，最后进行测试验证。感知层的数据采用参数监控点的设计，方便了数据的管理，并用参数监控点连读的方式，节省了与通信模块与电控模块之间通信的次数。传输层的数据采用定时、差异化、批量上报的方式，剔除大量重复数据，大大节省了数据传输过程中由于协议封装造成的额外开销，并给服务器减轻负担，提高了系统的整体效率；通过数据断网续传的方式，保证了数据的可靠性，避免了关键数据的丢失；使用断点续传的远程更新机制，提高了设备在网络较差的情况下，下载更新文件的稳定性，减少了流量的浪费。平台层和应用层的数据使用了消息队列机制进行传输，降低了系统间各个模块的耦合性，提高了系统面对高并发场景下的抗压能力。测试表明数据在离线时能被通信模块保存，且在通信模块连上网络后能全部上报，最长离线数据存储时间为 12 分钟；断点续传的远程更新方式在网络情况较差时，更新文件下载成功率也为 100%；整个系统的数据流量使用情况大幅减少，比不进行优化的透传模式流量使用减少了 86.8%；最后，对整个系统的稳定性进行分析，进行了为期七天的暴力测试，系统只出现了一次蓄电池电量不足的故障警报，证明了本系统的稳定性。

第5章 总结与展望

5.1 总结

本文调研了目前市场上常用的光伏清洁机器人，研究清洁过程中的需求痛点以及技术不足，设计了一套智能光伏清洁机器人控制系统。通过结合嵌入式设备，云平台，前后端，微服务等一系列先进技术的运用，使其具有智能清洁，远程监控，故障报警，远程更新等多项功能。并针对在实际开发运行过程中发现的双电机运行不同步导致机器人容易自锁在轨道上和监控数据在本文所设计的系统中传输的效率性、安全性，稳定性的问题进行了研究和设计。

本文的主要工作如下：

(1) 通过对目前市场上光伏清洁机器人的调研和查看相关的论文文献，分析了当前光伏清洁机器人的技术，存在着智能化程度不够高，清洁工作还过度依赖人的参与，无法根据诸如天气等情况进行自主清洁，并且机器人没有连接加入互联网，缺少有效的数据采集分析和监控手段，没有后续更新的能力等问题。在物联网技术快速发展的环境下，构建一整套智能光伏清洁机器人控制系统具有十分重要的意义。

(2) 对光伏清洁机器人系统中的各个功能模块的设计进行了详细介绍。硬件部分通过以 GD32F103RCT6 芯片为核心的电控模块和以 Air720 模组为核心的通信模块来实现整体机器人的清洁和远程运维功能。通过一系列传感器来实时获取机器人的各种状态，电控模块和通信模块通过 RS485 总线进行通信，并由通信模块将所有的监控点数据进行上报至云平台。最后通过对 Web 端和小程序端的开发，可视化的展示机器人的各种状态信息，方便了不同光伏电站对各自清洁机器人的管理。

(3) 针对光伏清洁机器人在运行时，受到外界环境干扰以及电机内参不一致等情况，会使得双电机同步过程中同步误差增大导致机器人会出现自锁、卡死在轨道上的现象。并且在第一代光伏清洁机器人实际部署运行过程中，发现行走位差故障的警报时常发生。本文设计的基于模糊控制器的双电机同步控制系统，通过无接触式角度传感器获取两个电机的位置差距，之后使用模糊规则和交叉耦合控制，让双电机之间的位移误差迅速缩小。通过实际运行测试，发现双电机的位移偏差在最大时，平均仅需 1.20 秒就能重新恢复至同步运行。最后对电站进行为期一个月的行走位差故障次数进行统计，发现故障大大减少，证明了该设计的稳定性。

(4) 针对数据在光伏清洁机器人控制系统传输过程中的分析，本文着重对处于感知层和传输层的边缘设备数据传输策略进行改进设计。对整个系统在实际使用过程中的稳定性、安全性、效率性、减少数据传输过程中不必要的损耗等方面进行考虑设计。感知层的数据采用

参数监控点设计，并用连读策略，方便了数据的管理，节省了与通信模块与电控模块之间通信的次数。传输层的数据采用定时、差异化、批量上报的方式，大大节省了数据传输过程中额外的开销，提高了系统的整体效率；通过数据离线续传的方式，提高了数据的准确性，避免了关键数据的丢失；使用断点续传的远程更新机制，提高了设备在远程更新时，下载文件的稳定性，减少了流量的使用。平台层和应用层的数据使用了消息队列机制进行传输，降低了系统间各个模块的耦合性，提高了系统面对高并发场景下的抗压能力。最后通过对系统的测试，证明了该系统的稳定性与可靠性。

5.2 展望

本文分析传统光伏清洁机器人的不足之处，通过对先进技术的运用，设计了智能光伏清洁机器人控制系统，提高了光伏清洁的自动化，智能化水平。但由于个人经验不足，时间有限，本文设计的系统还存在较多可优化的地方：

（1）本文设计的光伏清洁机器人为单排式的光伏清洁机器人，意味着每一排光伏组件都需要安装一个光伏清洁机器人，这对电站的清洁成本造成了较大的负担。之后将对跨排式清洁机器人进行分析，铺设转运轨道，安装机器人转运车，使一台光伏清洁机器人能通过轨道和转运车，清洁多排光伏组件，以提高的光伏清洁机器人的利用率。

（2）本文在探究双电机的同步控制时，仅改进了同步控制结构，控制算法还是沿用了传统的 PID 控制器。未能考虑环境变化以及设备老化对控制器性能的影响，在后续研究中需要进一步研究自适应控制的在本系统中的应用，提高控制器的鲁棒性。

（3）在数据传输策略的优化方面，只对本系统的边缘设备进行了优化研究，缺少对平台层与应用层的优化。在后期可以对物联网各个层次有更深入的研究，并针对各个层的数据传输特点提出相应的优化策略。

（4）在大数据的背景下，可以对通信模块上传的数据进行分析，检测出设备异常状态，同时针对光伏清洁机器人部署的具体工作环境和场地，为其后续优化提供思路和数据支持。此外，还有摄像头采集的光伏电站实时画面，由于时间有限，还未进行进一步研究，之后可以通过摄像头传回的图片，对灰尘、遮蔽物的检测进行研究，以便更加精准的控制清扫频率。

致谢

相逢一见太匆匆，校内繁花几度红，研究生的时光也即将在这个春天走到终点。回忆在杭州电子科技大学电子信息学院求学的三年，我有过茫然无知的时候，有过与同学老师一起开心快乐的时候，也有过为了学习新的知识废寝忘食的时候。学院浓厚的学术氛围和追求创新的科研环境，不断地鞭策着我前行。这三年研究生生活，是我一生中最难忘的时段，感谢每一个在我前行路上帮助我的人。

首先，感谢我的导师陈科明副教授，在论文的选题、课题的创新以及论文的定稿等各个过程中，陈老师都给予了我认真的指导，让我收获巨大。与陈老师朝夕相处的三年的时间里，陈老师的严谨的治学，渊博的知识以及一丝不苟的工作态度潜移默化的影响着我，不断的激励我，也让我一直保持着对知识的渴望。在今后的日子里，我也会牢记陈老师的教诲，脚踏实地，勇于创新。

感谢我的同门陈立宇、麻志翔、王梦瑶以及师兄师姐师弟师妹们。我们在学习上一一起进步，在工作上一一起克服困难，在生活中一起拥有美好的回忆。我感到非常荣幸能在研究生生涯中遇见你们这样优秀的同学。

感谢我的室友陆康，金静波，陈毅，感谢你们这三年来的陪伴，与我一起品尝生活中的酸甜苦辣，喜怒哀乐。

感谢我的挚友林可凡同学，你是我从初中一直到研究生都在一起学习的同学，是我最重要的朋友。感谢你这十三年来的陪伴，我们的友谊天长地久。

感谢我的父母及家人，感谢这三年来你们对我无私的支持和鼓励，你们永远是我在外漂泊时温暖的港湾，让我幸福的走过这二十几年的人生之路。

感谢论文评阅和答辩委员会的老师，感谢你们的耐心，我一定会悉心听取你们宝贵的意见并积极改正。

最后，衷心地祝愿所有人，身体健康，万事如意，让我们一起携手奋进，迎接更美好的明天！

参考文献

- [1] Chen B , Jin Y . Adjusting productivity measures for CO₂ emissions control: Evidence from the provincial thermal power sector in China[J]. Energy Economics, 2020, 87.
- [2] 方行明, 何春丽, 张蓓. 世界能源演进路径与中国能源结构的转型[J]. 政治经济学评论, 2019, 10(2): 178-201.
- [3] 方圆, 张万益, 曹佳文, 等. 我国能源资源现状与发展趋势[J]. 矿产保护与利用, 2018 (4): 34-42.
- [4] Thengane S K, Bandyopadhyay S. Biochar mines: Panacea to climate change and energy crisis[J]. Clean technologies and environmental policy, 2020, 22: 5-10.
- [5] 国家能源局. 我国光伏发电并网冲击容量突破3亿分布式发展成为新亮点[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/20/c_1310432517.htm, 2022.1.20.
- [6] 杜小强, 刘恩晓, 武传宇, 等. 基于高速气流的光伏板表面灰尘去除分析与试验[J]. 中国机械工程, 2018, 29(24): 2959.
- [7] Li H F, Lin H Y, Tan Q K, et al. Research on the policy route of China's distributed photovoltaic power generation[J]. Energy Reports, 2020, 6(02): 254-263.
- [8] Wang Y, He J J, Chen W Y. Distributed solar photovoltaic development potential and a roadmap at the city level in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 141(01): 1-10.
- [9] 张东, 俞凯, 闫承涛, 等. 旱区光伏组件疏水性表面自清洁研究与参数优选[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 232-239.
- [10] 李练兵, 王增喜, 刘斌, 等. 太阳能电池积灰对其发电性能影响的研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(06): 1418-1422.
- [11] Guo B, Javed W, Figgis B W, et al. Effect of dust and weather conditions on photovoltaic performance in Doha, Qatar[C]//2015 First Workshop on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE). IEEE, 2015: 1-6.
- [12] Li X, Qin H, Zhang Y, et al. Dust effect on the optical-thermal properties of absorber plate in a transpired solar air collector[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 169: 13-21.
- [13] Asmelash E, Prakash G. Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects[J]. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2019.

- [14] Kazem H A, Chaichan M T. Experimental analysis of the effect of dust's physical properties on photovoltaic modules in Northern Oman[J]. *Solar Energy*, 2016, 139: 68-80.
- [15] Liu F, Zhang Z, Zhao Y, et al. A method of calculating the daily output power reduction of PV modules due to dust deposition on its surface[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2019, 9(3): 881-887.
- [16] Nepal P, Korevaar M, Ziar H, et al. Accurate soiling ratio determination with incident angle modifier for PV modules[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2018, 9(1): 295-301.
- [17] Tang S X, Xing Y, Chen L, et al. Review and a novel strategy for mitigating hot spot of PV panels[J]. *Solar Energy*, 2021, 214(01): 51-61.
- [18] Bressan M, Gutierrez A, Gutierrez L G, et al. Development of a real-time hot-spot prevention using an emulator of partially shaded PV systems[J]. *Renewable Energy*, 2018, 127(03): 334-343.
- [19] 宁会峰, 程荣展, 王伟志, 等. 积灰对光伏发电的影响及除尘效果实验研究[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(11): 120-125. DOI: 10.19912/j.0254-0096.2020.11.016..
- [20] 王永强. 基于无人机及机器视觉的光伏电站“热斑效应”检测系统研究[J]. *科技视界*, 2019, 000(015): 53-54.
- [21] Gupta V, Sharma M, Pachauri R K, et al. Comprehensive review on effect of dust on solar photovoltaic system and mitigation techniques[J]. *Solar Energy*, 2019, 191: 596-622.
- [22] Javed W, Guo B, Figgis B, et al. Dust potency in the context of solar photovoltaic (PV) soiling loss[J]. *Solar Energy*, 2021, 2020: 1040-1052.
- [23] Hachicha A A, Al-Sawafta I, Said Z. Impact of dust on the performance of solar photovoltaic (PV) systems under United Arab Emirates weather conditions[J]. *Renewable Energy*, 2019, 141(01): 287-297.
- [24] 蒋琳, 苏建徽, 施永, 等. 基于红外热图像处理的光伏阵列热斑检测方法[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(08): 180-184.
- [25] 潘文峰, 陆晨, 王加鸿, 等. 晶体硅光伏组件的热斑效应详解[J]. *太阳能学报*, 2019, 12(01): 48-52.
- [26] 曹梦楠. 分布式光伏组件清洗机器人开发及应用[D]. 吉林: 东北电力大学, 2020.
- [27] Alzarooni F I, Alkharji A K, Alsuwaidi A A, et al. Design and Implementation of an Automated Dry Solar-Panel Cleaning System[C]//2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). IEEE, 1-4.
- [28] Cai S, Bao G, Ma X, et al. Parameters optimization of the dust absorbing structure for photovoltaic panel cleaning robot based on orthogonal experiment method[J]. *Journal of cleaner production*, 2019, 217: 724-731.

- [29] 赵波, 范思远, 曹生现, 等. 移动式光伏板积灰干式清洗装置研制及应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(06): 1707-1713+1867.
- [30] 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(05):195-201.
- [31] 谷玉之, 瞿畅, 徐魏魏, 等. 光伏组件自动清洁机器人系统设计与研究[J]. 机械设计, 2020, 37(09): 49-55.
- [32] 蒋利雷. 光伏组件积灰负压吸附式六轮无水清洁机器人的研制[D]. 东北电力大学, 2022. DOI: 10.27008/d.cnki.gdbdc. 2022.000213.
- [33] Antonelli M G, Zobel P B, De M A, et al. Autonomous robot for cleaning photovoltaic panels in desert zones[J]. Mechatronics, 2020, 68(01):1-3.
- [34] Ronnaronglit N, Maneerat N. A cleaning robot for solar panels[C]//2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST). IEEE, 2019: 1-4.
- [35] 董伯先. 浅析光伏电站清洁机器人的应用现状[J]. 太阳能, 2020, No.311(03):46-50.
- [36] Yepes A G, Vidal A, Lopez O, et al. Evaluation of techniques for cross-coupling decoupling between orthogonal axes in double synchronous reference frame current control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3527-3531.
- [37] 耿强, 王少炜, 周湛清, 等. 改进型偏差耦合多电机转速同步控制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(03): 474-482.
- [38] Shu R, Wei J, Tan R, et al. Investigation of dynamic and synchronization properties of a multi-motor driving system: Theoretical analysis and experiment[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 153(06): 107496-107504.
- [39] Wang C, Zhang D, Zhuang H, et al. Coordinated synchronization control of multi-motor system based on synergetic control theory[C]. 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2018:160-164.
- [40] 齐广峰, 池明, 张洁. 某舵机控制器双电机交叉耦合同步控制研究[J]. 电动工具, 2022, No.224(06): 14-17. DOI: 10.16629/j.cnki.1674-2796. 2022.06.004.
- [41] 胡松钰, 钱松, 吴伟, 等. 相邻交叉耦合直线开关磁阻电机位置同步控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23):7024-7031+7094.
- [42] 任宏. 浅谈物理网安全问题及措施[J]. 计算机光盘软件与应用, 2012 (13): 54-55.
- [43] 赵多银. 电子信息技术在物联网中的应用与融合发展思路分析[J]. 网络安全技术与应用, 2022, (05): 136-137.
- [44] 张晓轩. 物联网技术在石油行业的应用分析及趋势研究[J]. 信息系统工程, 2022, (12): 63-66.

- [45] CHIANG M, TAO Z. Fog and Io T: An Overview of Research Opportunities[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 3(6): 854-864.
- [46] 董辉. 基于Android智能终端的工业监测系统设计[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [47] XUN X. From cloud computing to cloud manufacturing[J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 2012, 28(1): 75-86.
- [48] 胡存. 基于物联网工业云平台系统设计[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
- [49] 代振楠. 工业互联网中基于边缘计算的任务卸载策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [50] TAKEDA A, KIMURA T, HIRATA K. Evaluation of edge cloud server placement for edge computing environments[C] 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-TW). IEEE, 2019: 2-2.
- [51] WANG TIAN, KE HAOXIONG, ZHENG XI, et al. Big Data Cleaning Based on Mobile Edge Computing in Industrial Sensor-Cloud[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(2): 1321-1329.
- [52] 丁春涛, 曹建农, 杨磊, 等. 边缘计算综述:应用、现状及挑战[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(03): 2-7.
- [53] Boualouache A, Nouali O, Moussaoui S, et al. A BLE-based data collection system for IoT: First International Conference on New Technologies of Information & Communication[C], 2016.
- [54] 邹萍, 张华, 马凯蒂, 等. 面向边缘计算的制造资源感知接入与智能网关技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(01): 40-48. DOI: 10.13196/j.cims. 2020.01.004.
- [55] 张晓天, 张健男, 黄冶, 等. 边缘技术在能源设备数据采集调度中的算法研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(34): 15230-15236.
- [56] Al-Turjman F, Mostarda L, Ever E, et al. Network Experience Scheduling and Routing Approach for Big Data Transmission in the Internet of Things[J]. IEEE Access, 2019, 7: 14501-14512.
- [57] 熊一鹏, 岳伟. FreeRTOS多任务调度机制在监控单元中的应用[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2021, 21(9): 64-66.
- [58] 吴晨红. 基于Modbus通信协议的信号采集系统[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [59] 赵苗苗, 陈鹏, 颜昌隆. GoAhead中JSON与命令行的适配机制与实现[J]. 电子设计工程, 2022, 30(24): 86-89+94.
- [60] 宋岸峰, 曾新顺, 宁占彬. 基于JSON的数据采集通信协议分析与实现[J]. 电脑编程技巧与维护, 2022, (03): 75-79.
- [61] 汪继伟. 太阳能光伏组件清扫机器人行程控制系统设计与实现[D]. 新疆大学, 2015.
- [62] 孙传有. 履带车双电机同步伺服控制技术研究[D]. 湖北工业大学, 2020. DOI: 10.27

- 131/d.cnki.ghugc. 2020.000196.
- [63] 张莉. 电机的同步控制在抹灰机上的应用研究[D]. 西安建筑科技大学, 2019. DOI: 10.27393/d.cnki.gxazu. 2019. 001595.
- [64] 叶林. 感应角度传感器的多参数优化及应用[D]. 上海交通大学, 2014.
- [65] Schaefer C F, Anthony K, Krupa S, et al. PID: the Pathway Interaction Database[J]. Nucleic Acids Research, 2008, 37(Database issue): D674-9.
- [66] 常明恒, 左洪超, 摆玉龙, 等. 两种耦合模糊控制的局地化方法研究[J]. 地球科学进展, 2021, 35(2): 1-12.
- [67] Liu Y C, Zhu Q D, Zhao N. Event-triggered adaptive fuzzy control for switched nonlinear systems with state constraints[J]. Information Sciences, 2021, PP (562): 28-43.
- [68] N. Sivaraman, K. Jomaa, F. Ndagijimana. Three dimensional scanning system for near-field measurements[C]. European Conference on Antennas&Propagation. 2017: 2866-2870.
- [69] Sobin C C. A survey on architecture, protocols and challenges in IoT[J]. Wireless Personal Communications, 2020, 112(3): 1383-1429.
- [70] Wu M, Lu T J, Ling F Y, et al. Research on the architecture of Internet of Things[C]//2010 3rd international conference on advanced computer theory and engineering (ICACTE). IEEE, 2010, 5: V5-484-V5-487.
- [71] Mills D, Martin J, Burbank J, et al. Network time protocol version 4: Protocol and algorithms specification[R]. 2010.
- [72] 贾杰峰, 王铮, 刘连照. 一款NTP授时监测终端设计与实现[J]. 无线电工程, 2020, 50(07): 554-557.
- [73] Gambi E, Montanini L, Pigni D, et al. A home automation architecture based on LoRa technology and Message Queue Telemetry Transfer protocol[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2018, 14(10): 1550147718806837.
- [74] 贵芳. 基于消息驱动的软件架构研究与实现[D]. 合肥工业大学, 2017.

附 录

作者在读期间发表的学术论文及参加的科研项目

参加的科研项目：

- [1] 光伏机器人智能集群控制系统第二期，横向课题(KYH043121088M).2021.11-2022.10
- [2] 中捷缝纫机工业互联网平台开发，横向课题(KYH043121031M). 2021.4-2022.3

公开的专利：

- [1] 陈科明,庞若雷,王佳敏,齐玲玲.基于改进粒子群自适应 PID 的光伏清洁机器人电机同步方法[P]. 浙江省: CN115765532A, 2023-03-07.(已公开, 2/4,导师第一发明人)
- [2] 陈科明,吴文楷,庞若雷,齐玲玲.基于 EEMD 和改进 POS-SVM 的轴承故障诊断方法[P]. 浙江省: CN114720132A, 2022-07-08.(已公开,3/4,导师第一发明人)