

微电路设计课程项目报告：智能自主导航扫地机器人

项目名称：智能自主导航扫地机器人（基于ROS2与STM32/ESP32架构）

课程名称：微电路设计

小组成员：冯亦珂、莫湘渝、郭丁赫

序 产品说明书

1 产品简介

BY3D-Pro 智能扫地机器人 是一款专为家庭环境设计的智能自主导航清洁终端。它集成了微电路技术与先进的人工智能算法，搭载高精度激光雷达导航系统，具备“能听、能看、会思考”的核心能力。不仅能通过手机/电脑网页端实时监控，更支持离线语音直接对话，为您带来真正的解放双手的清洁体验。

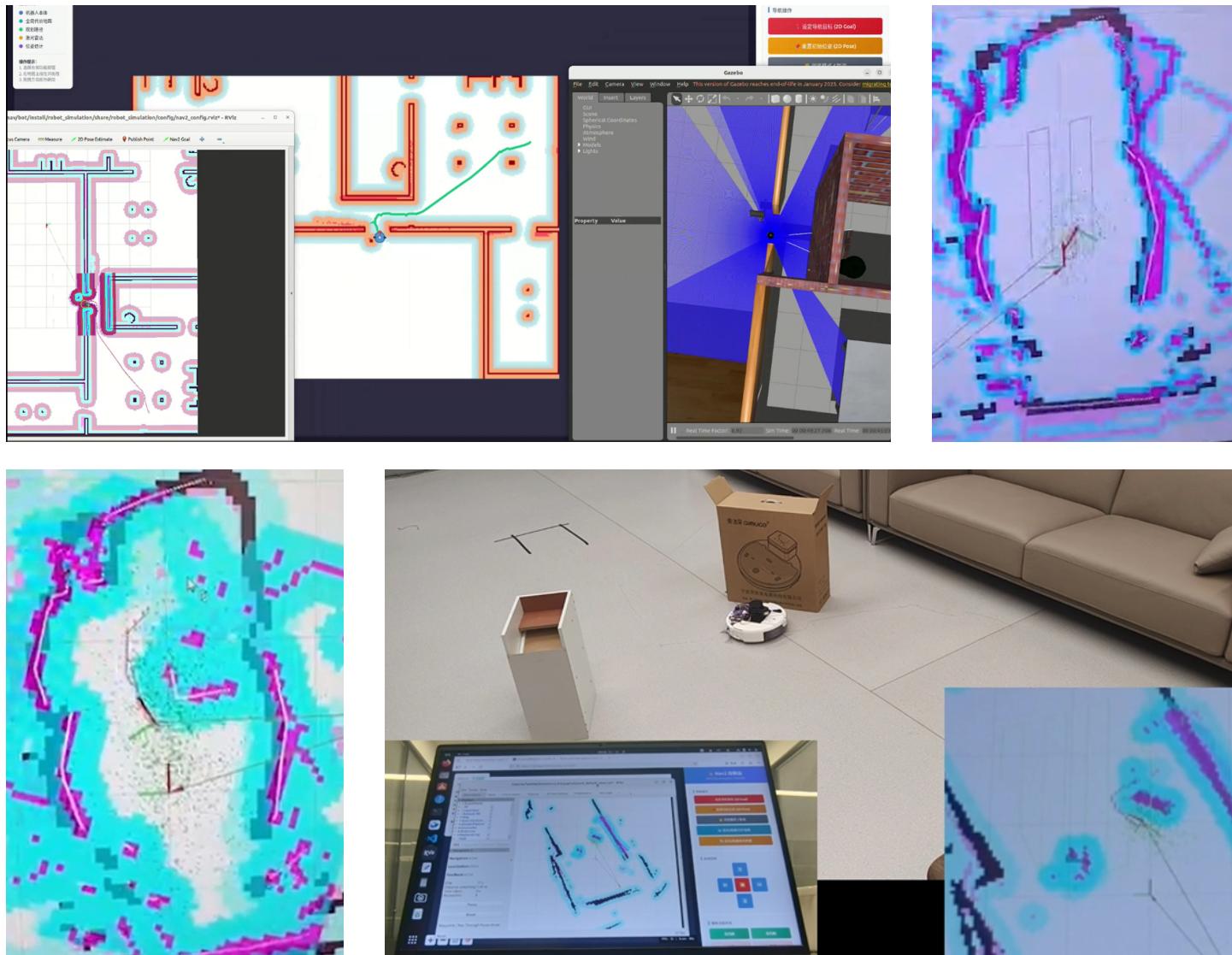
2 产品参数

参数项	规格指标
主机尺寸	直径 350mm x 高度 96mm
导航方式	LDS 激光雷达 + IMU 惯性导航
越障能力	20mm
最大吸力	2500Pa (强力模式)
电池规格	14.4V / 5200mAh (支持自动回充)
控制方式	Web 端控制台 / 离线语音控制
无线连接	WiFi 2.4GHz / WebSocket协议
核心处理	STM32F4 (运动控制) + ESP32 (通信) + PC (算法)

3 核心功能亮点

- 精准雷达建图：**采用 Cartographer 算法，毫米级还原家庭户型图，并在手机端实时生成彩色可视化地图。
- 智能弓字清扫：**内置智能路径规划算法，自动划分区域进行“弓”字形填充清扫，不漏扫、不重复，效率倍增。
- AI 离线语音助手：**搭载豆包蒸馏模型，无需联网，喊一声“智能扫地”，机器人即刻响应。

- 动态避障系统：**TEB 算法加持，实时感知行走路径上的拖鞋、宠物等动态障碍物，灵巧绕行不卡困。
- 跨平台无感连接：**无需下载 App，手机或电脑浏览器输入设备 IP 即可进入全功能控制驾驶舱。
- 精准运动性能：**高速稳定，低速平滑，运动性能优异。



4 快速使用指南

- 开机：**长按机身顶部电源键 3 秒，待蓝色指示灯常亮。
- 配网连接：**搜索机器人发出的 WiFi 热点并连接。
- 开始清扫：**
 - 语音方式：**直接对机器人说“开始清扫”。
 - 网页方式：**打开浏览器，输入默认地址 `192.168.4.1`，点击界面上的“一键智能清扫”。
- 实时监控：**在网页端可实时查看电量剩余、清扫轨迹及当前的激光雷达视野。

第 1 章 项目需求分析

1.1 项目背景介绍

随着人工智能与物联网技术的飞速发展，服务型机器人已逐渐成为智能家居生态的重要组成部分。扫地机器人作为最早商业化落地的家庭服务机器人之一，其核心技术已从随机碰撞清扫进化为基于激光雷达（LDS）或视觉（vSLAM）的自主规划清扫。

本课程项目旨在通过微电路设计与嵌入式系统开发，从零构建一款具备现代智能特征的扫地机器人。项目不仅要求掌握底层的电路设计与电机控制，更强调上层算法（SLAM建图、路径规划）与下层硬件的软硬协同能力。通过本项目，我们致力于解决传统开源方案中存在的通信延迟高、交互体验差、路径规划不合理等痛点，打造一款“能听、能看、会思考”的智能清洁终端。

1.2 设计需求与相关指标确定

为了确保机器人的实用性与先进性，我们制定了以下详细的设计需求与技术指标：

1.2.1 功能需求

- 自主建图与导航：** 机器人需能在陌生环境中利用激光雷达构建高精度地图，并实现自主定位。
- 全覆盖清扫：** 能够对指定区域进行弓字形（牛耕式）覆盖清扫，尽量减少漏扫区域。
- 动态避障：** 在运动过程中能实时感知并规避突发障碍物（如行人、宠物）。
- 多模态交互：** 支持跨平台的Web端可视化控制，以及离线语音指令控制。
- 基础清洁功能：** 具备滚刷、边刷、吸尘风机、水泵的独立控制及防跌落能力。

1.2.2 性能指标

- 控制系统频率：**
 - 底层电机PID控制频率： $\geq 1000\text{Hz}$
 - IMU姿态解算频率： $\geq 100\text{Hz}$
 - 上层导航控制闭环频率：15-20Hz
- 定位精度：** 融合里程计误差 $< 2\%$ （长距离直线行驶测试）。
- 通信延迟：** 局域网内控制指令延迟 $< 50\text{ms}$ 。
- 续航能力：** 支持 14.4V 锂电池供电，具备充放电管理与电压监测。
- 运动精度：** 运动精度偏差 $< 1\%$ （长距离直线行驶测试）

1.3 项目分工

本项目由三人小组协作完成，具体分工如下：

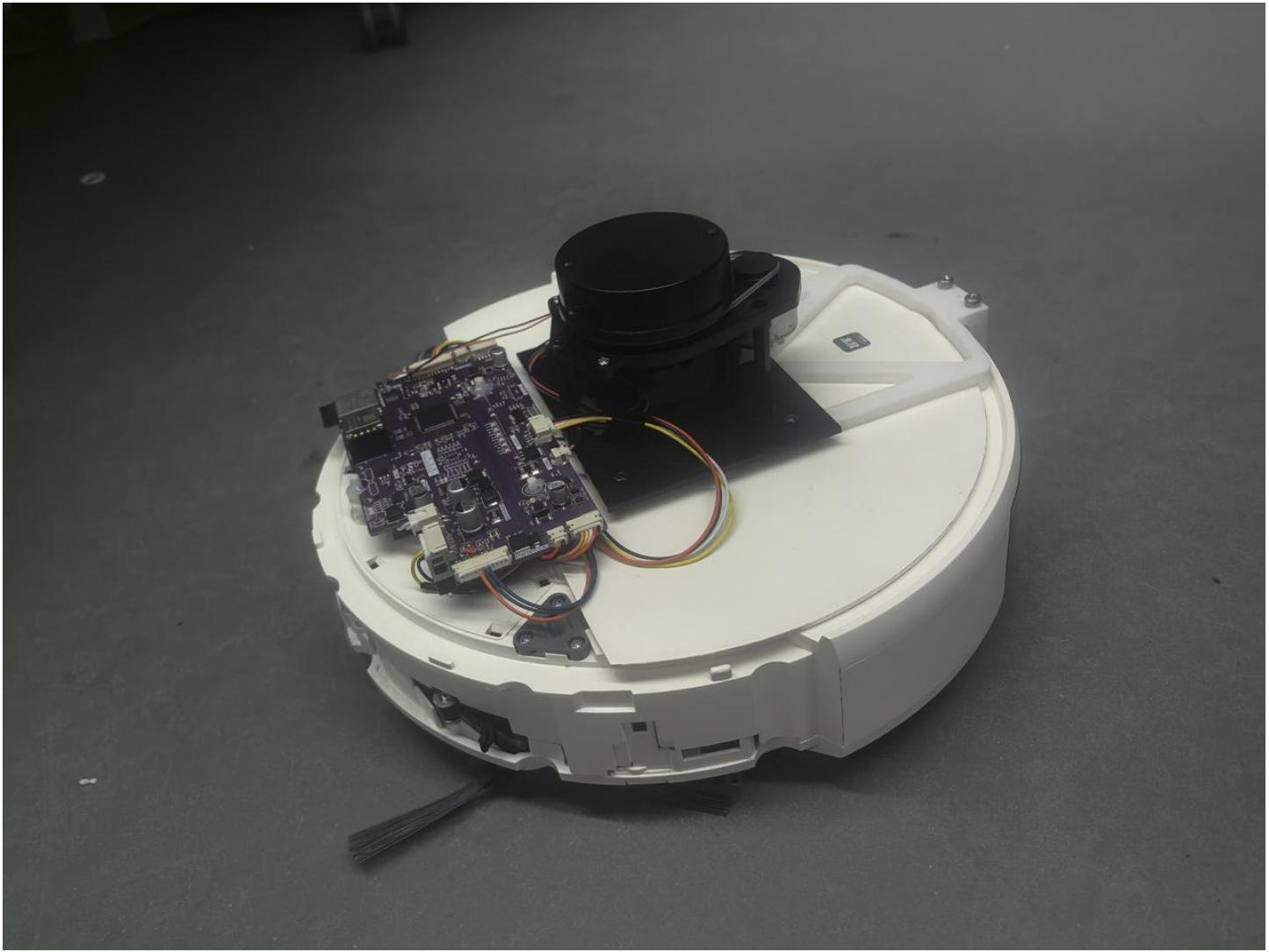
成员姓名	主要职责	具体工作内容
郭丁赫	机械结构与部分UI设计	负责整体机械结构加装设计（雷达/主板支架）以及部分UI设计。
莫湘渝	嵌入式软硬件与驱动开发	负责PCB电路板设计与焊接、电源管理模块调试、维护升级，STM32底层驱动开发（电机PID、IMU驱动，各路其他传感器，语音模块预设命令等）、ESP32通信程序编写、系统时序调度与分层架构实现。
冯亦珂	上位机算法与UI交互	负责ESP32和上位机MicroROS环境搭建、上下位机通信系统实现、SLAM建图算法调优实现、Nav2框架搭建、导航功能实现、A*路径规划算法优化创新、TEB局部控制器选型调优、Web端UI开发及语音模块部署。

第2章 机械结构创新设计

机械结构是机器人稳定运行的物理基础。本项目在原有扫地机器人底盘基础上进行了针对性的加装设计与优化，重点解决了核心控制板与新增传感器的安装适配问题。

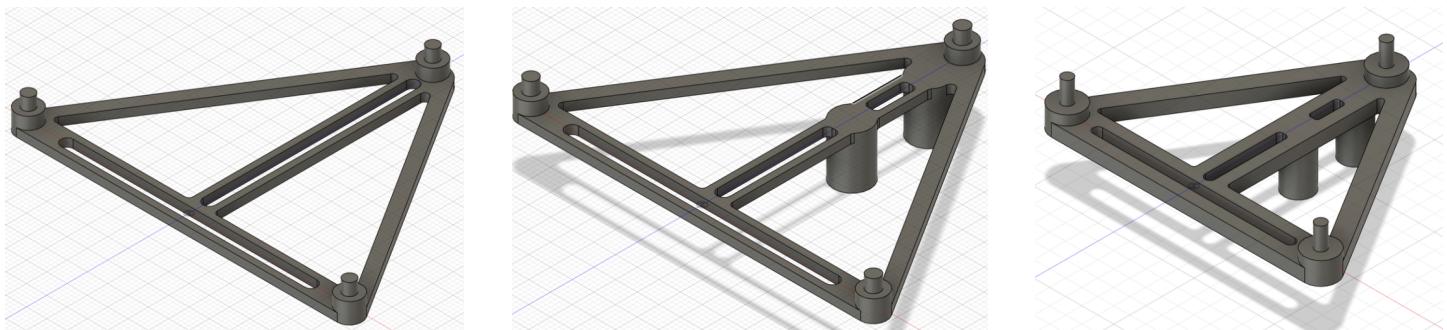
2.1 总体外观与布局

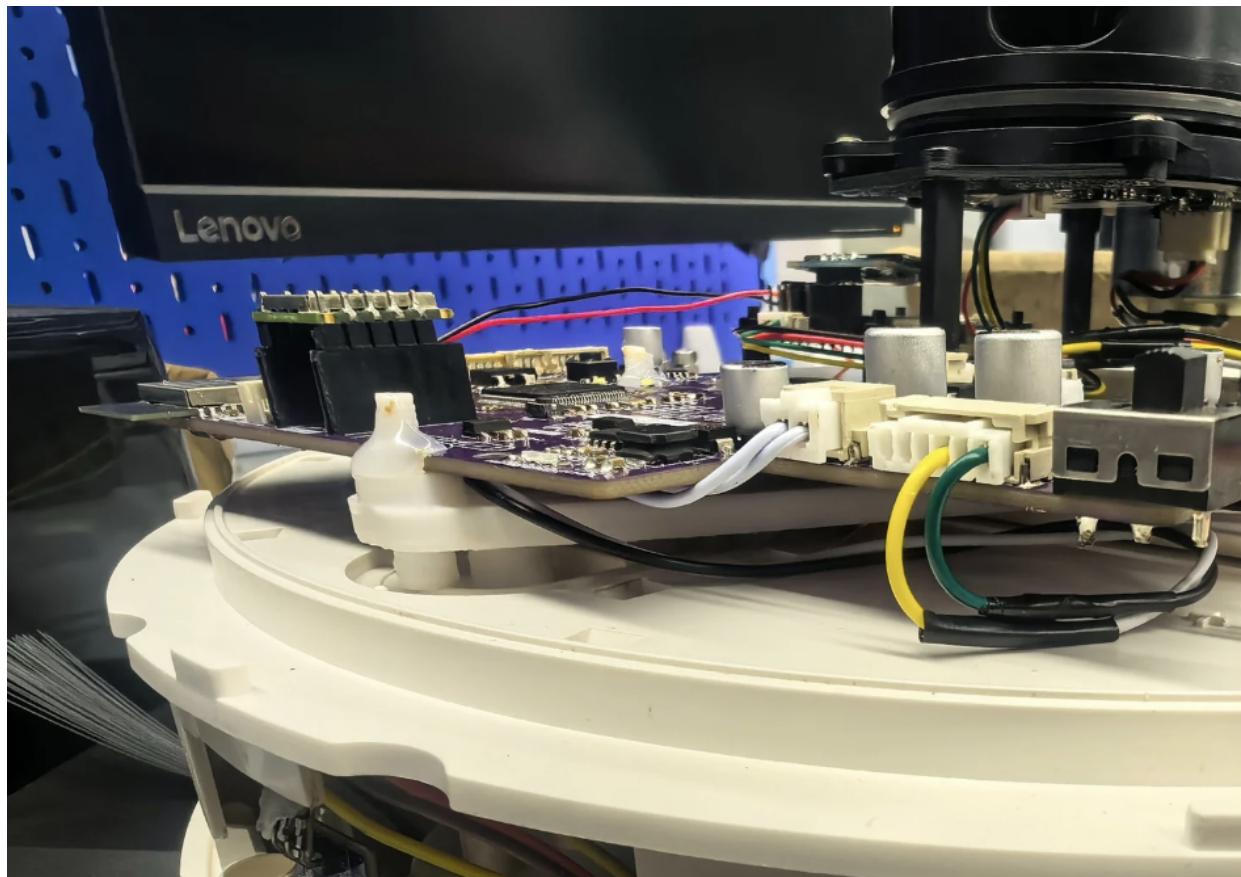
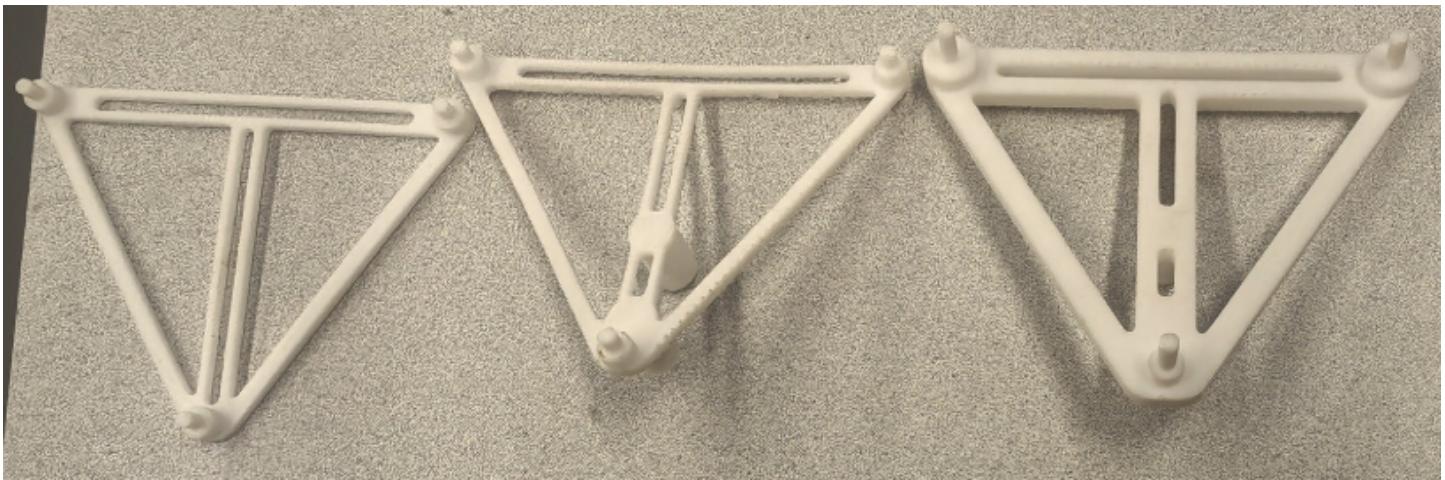
机器人保留了成熟的圆形底盘设计以适应家庭环境的狭窄通过性。主要改动在于顶部的层叠式结构，用于容纳新增的主控板、激光雷达及电源管理模块。为了保证陀螺仪以及雷达稳定，整体布局追求紧凑与重心的平衡，避免因重心过高导致运动不稳。整体采用一体白色pla的3d打印设计，尽可能用最少的定位点达到精准稳定的定位效果以实现去整体的整洁，美观，大方。



2.2 核心电路板支架优化

针对核心电路板的固定，我们经历了从“能用”到“好用”的迭代：

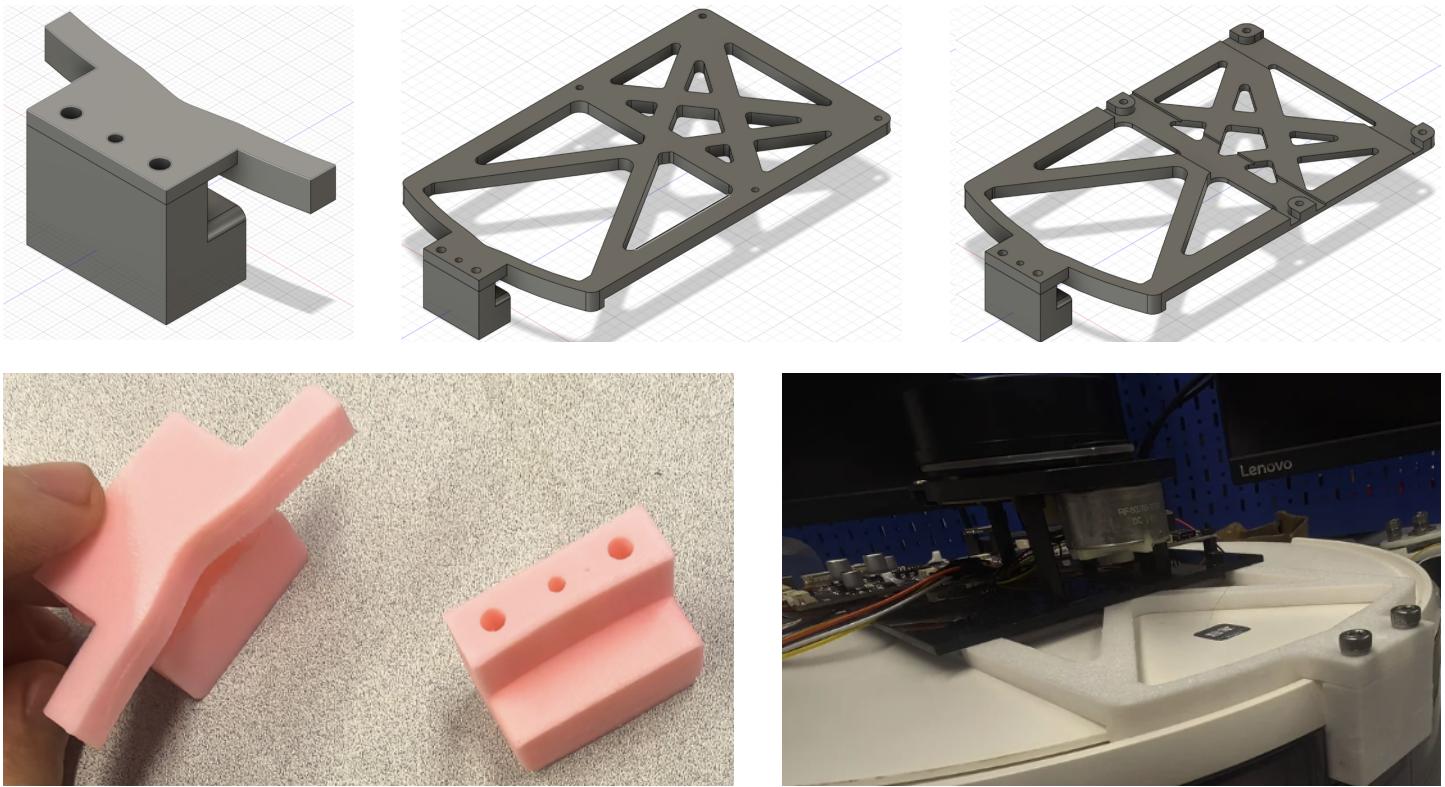




- **初版问题：**早期方案采用简单平面固定，中间由于镂空过大，整体厚度过低，且定位只能靠胶固定，导致抗震性较差。
- **优化方案：**采用了**三角形框架设计**。利用底盘原有的按钮槽位及整体上平面阶梯形作为定位基准，保证了整体的稳定性。
- **优势分析：**相比于矩形结构，三角形结构具有更好的几何稳定性，有效减少了机器人在运动或越障过程中因震动导致的电路板松动风险，且更节省材料，定位孔采用过渡配合方便拆装以及进行维护，同时为了方便走线，进行阶梯式设计尽可能保证陀螺仪的水平。

2.3 激光雷达（Lidar）支架设计

激光雷达是机器人的“眼睛”，其安装位置的水平度与稳固性直接影响建图质量。



- **非破坏性安装：**为了不破坏原有底盘的完整性，我们创新性地利用了侧面集尘仓的侧面槽以及开盖处的圆环槽作为定位卡点，既不影响正常使用，又利用了良好的定位点，美观有效的镂空既节省了材料也不会影响整体的稳定性。
- **固定方式：**采用螺丝夹紧的机械结构固定，既保证了雷达在高频旋转时的稳定性（无晃动），又便于后续的拆卸维护与调试。最终实现了功能性与整洁美观的统一。

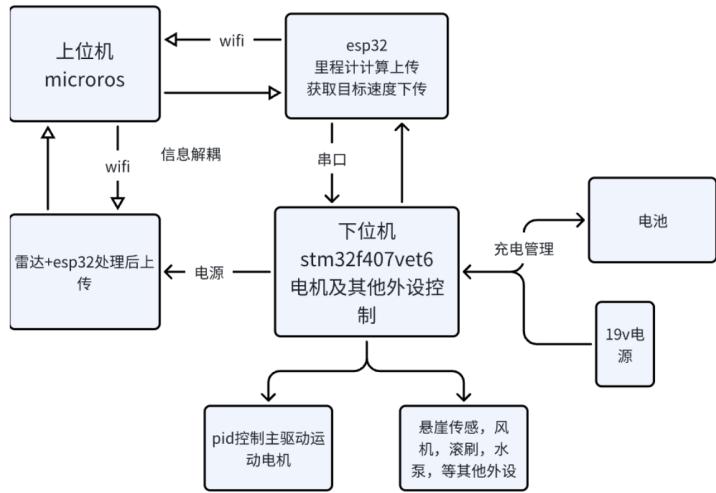
这两个模块都经历过不断迭代，采取更稳定的定位点，权衡稳定性实用性以及美观，最终产出的效果，为了达到过渡配合的效果进行了多次的模块测试，这也为最终“真”直线行驶的功能做了良好的硬件机械基础。

第3章 硬件/嵌入式系统设计

嵌入式系统是机器人的“神经中枢”，负责处理传感器数据、执行运动控制及维持系统通信。

3.1 系统架构：解耦与分层

系统整体遵循**计算分层、链路解耦、实时隔离、任务下沉**的架构设计原则，以应对感知数据高密度、运动控制高频率以及通信大吞吐并发存在的复杂工况需求。在软硬件层面，系统将**感知链路、控制链路、定位与导航链路、电源管理链路**进行明确划分，并通过独立MCU与专用通信协处理器实现功能与负载隔离，避免雷达点云等大规模数据流对实时控制任务造成阻塞或抖动，从系统结构上保证控制确定性与整体稳定性。



3.1.1 上位机（大脑 – PC/x86）

上位机作为系统的全局计算与决策核心，运行于x86架构Linux环境，部署ROS2 Humble/LTS发行版，充分利用多核CPU的并行计算能力及DDS中间件提供的QoS机制，承担系统中**非硬实时但计算密集型任务**。

上位机作为系统的全局计算与决策核心，运行于x86架构Linux环境，部署ROS2 Humble/LTS发行版，充分利用多核CPU的并行计算能力及DDS中间件提供的QoS机制，承担系统中**非硬实时但计算密集型任务**。

在功能上，上位机主要负责MicroROS Agent的运行，用于桥接底层嵌入式节点与ROS2 DDS网络；同时部署Cartographer 2D SLAM，实现雷达点云与位姿图的构建、回环检测以及全局一致性优化。在此基础上，系统运行Nav2 Navigation Stack，通过行为树（BT）组织导航逻辑，结合Costmap、控制器插件与恢复行为完成自主导航任务。路径规划部分支持A*、Hybrid A*或Smac等算法插件，以适配不同场景下的运动约束需求。此外，上位机还承担多源数据融合与系统可视化任务，通过RViz2、Foxglove等工具对TF树、轨迹与状态信息进行实时监控。

在通信策略上，上位机对速度指令 `cmd_vel` 的发布采用 **BEST EFFORT / KEEP_LAST(5)** 的QoS策略，以降低延迟并允许短时丢包；而里程计与状态信息的回传则采用 **RELIABLE / TRANSIENT_LOCAL**，确保在网络波动或节点重连后系统状态仍能保持一致性。

3.1.2 下位机（小脑 – STM32F407VET6）

下位机作为系统的**硬实时控制核心**，基于STM32F407VET6运行裸机程序，通过定时器与中断驱动的任务调度机制实现高确定性控制。其设计目标是在不依赖复杂操作系统的前提下，稳定执行对时间抖动高度敏感的底层控制任务。

具体而言，下位机负责双轮差速底盘的闭环电机控制，采用PID控制并结合前馈补偿以提升动态响应性能；同时对编码器数据进行高速捕获与解算，实现实时里程计算，包括速度估计、位姿积分与航向补偿。电源管理同样由下位机独立完成，涵盖电池电压、电流与温度的周期采样，以及工作模式切换与过压、欠压保护逻辑。此外，下位机还承担各类外设的直接控制与安全状态监测，例如风机、滚刷、水泵、悬崖传感器与状态指示模块，并负责与通信协处理器之间的实时数据交互。

在性能指标方面，系统PID主控制回路运行频率达到 **1000 Hz**，由硬件定时器触发高优先级任务；编码器反馈分辨率达到 **20k-40k PPR**，采用硬件定向与双相解码方式。通过底盘对称动力学参数标定与闭环反馈优化，系统在5米直线行驶距离内的偏差控制在 ±1.2 cm 以内，角速度误差小于 ±1.5 deg/s，满足精细运动控制需求。

3.1.3通信中转（桥梁 - 双ESP32协处理方案）

为避免雷达点云、速度指令与状态反馈在同一通信链路上竞争带宽，系统引入**双ESP32协处理架构**，在物理与协议层面对感知链路与控制链路进行完全隔离，从而提升系统整体的实时性与鲁棒性。

模块	角色定位	主要负载	关键指标
ESP32 #1	感知协处理器	雷达数据解包、协议重组、点云上传	6-10 Mbps稳定吞吐
ESP32 #2	控制协处理器	cmd_vel订阅、速度指令转发、odom回传	15-20 Hz指令稳定

其中，感知链路由ESP32 #1独立承担，负责对ToF雷达或串口雷达（如LD19、A1M8、Cybot D1等）的数据进行协议解析、帧校验、坐标转换以及必要的数据压缩处理，并通过WiFi以UDP或TCP方式上传至上位机。STM32不参与任何雷达通信协议栈，从结构上杜绝感知数据对控制回路的干扰。

控制链路则由ESP32 #2专门负责，其订阅上位机发布的 cmd_vel 指令，并将其转换为轮速目标或 PWM 占空比下发至STM32；同时将实时里程计 odom 与底盘状态信息回传至ROS2系统。为保证运行安全，该链路内置指令超时看门机制，当连续200 ms未接收到速度指令时，系统自动进入减速、停止并切换至安全模式。

3.1.4定位与导航数据流

- 雷达数据 → ESP32 #1 → MicroROS Agent → Cartographer SLAM → 生成位姿TF
- Odom数据 → STM32 → ESP32 #2 → ROS2 odom topic → 参与TF融合（里程计-雷达位姿校正）
- 上位机路径规划 → 生成全局path → 控制器生成速度cmd_vel → 由ESP32 #2转发至STM32

系统架构的关键优势

1. **感控解耦**：大数据雷达点云不会阻塞控制回路。
2. **分层实时隔离**：STM32专注硬实时闭环，PC处理重计算与全局优化。
3. **可扩展性**：ROS2插件体系支持后续算法替换（如NDT SLAM、MPPI控制器等）。
4. **链路冗余与重连恢复**：DDS QoS保障掉线恢复后的状态一致性。
5. **硬件资源合理下沉**：编码器中断与PID任务下沉至MCU，降低通信频率依赖。

在数据流层面，系统形成了清晰、单向且可追溯的处理链路：雷达数据经ESP32 #1上传至MicroROS Agent后进入Cartographer SLAM模块，生成全局一致的位姿与TF关系；底盘里程计数据由STM32采集后经ESP32 #2发布至ROS2 odom 话题，参与里程计与雷达位姿的融合校正。上位机基于融合后的

位姿信息进行全局路径规划，生成规划路径并由控制器输出速度指令 `cmd_vel`，最终通过控制链路下发至底盘执行。

3.2 硬件电路设计

系统电路设计整体遵循**电源域隔离、驱动模块化、传感器抗干扰、接口机械兼容以及冗余安全设计**五项核心原则，以满足移动机器人在高负载运行、多传感器并发工作以及复杂电磁环境下对稳定性与可靠性的要求。通过在电源、功率、信号与接口层面进行功能分区与物理隔离，系统有效降低了大电流、高噪声单元对逻辑控制与感知模块的影响，为整机的长期稳定运行提供了硬件基础。

3.2.1 主控与外设传感器

系统主控采用**STM32F407 系列 MCU**，作为整机控制与实时调度核心，负责运动控制、传感器数据采集、通信协议处理及系统状态管理等任务。MCU 工作于独立的**3.3 V 逻辑电源域**，由低噪声 LDO 供电，并在电源入口与关键引脚处布置去耦与滤波网络，以提升系统在高频 PWM 与电机负载变化条件下的运行稳定性。核心控制回路与时间敏感任务通过硬件定时器与中断机制实现，保证控制周期的确定性。同时电路还含有**Esp32核心电路，但主要用于数据透传，故不多作解释**

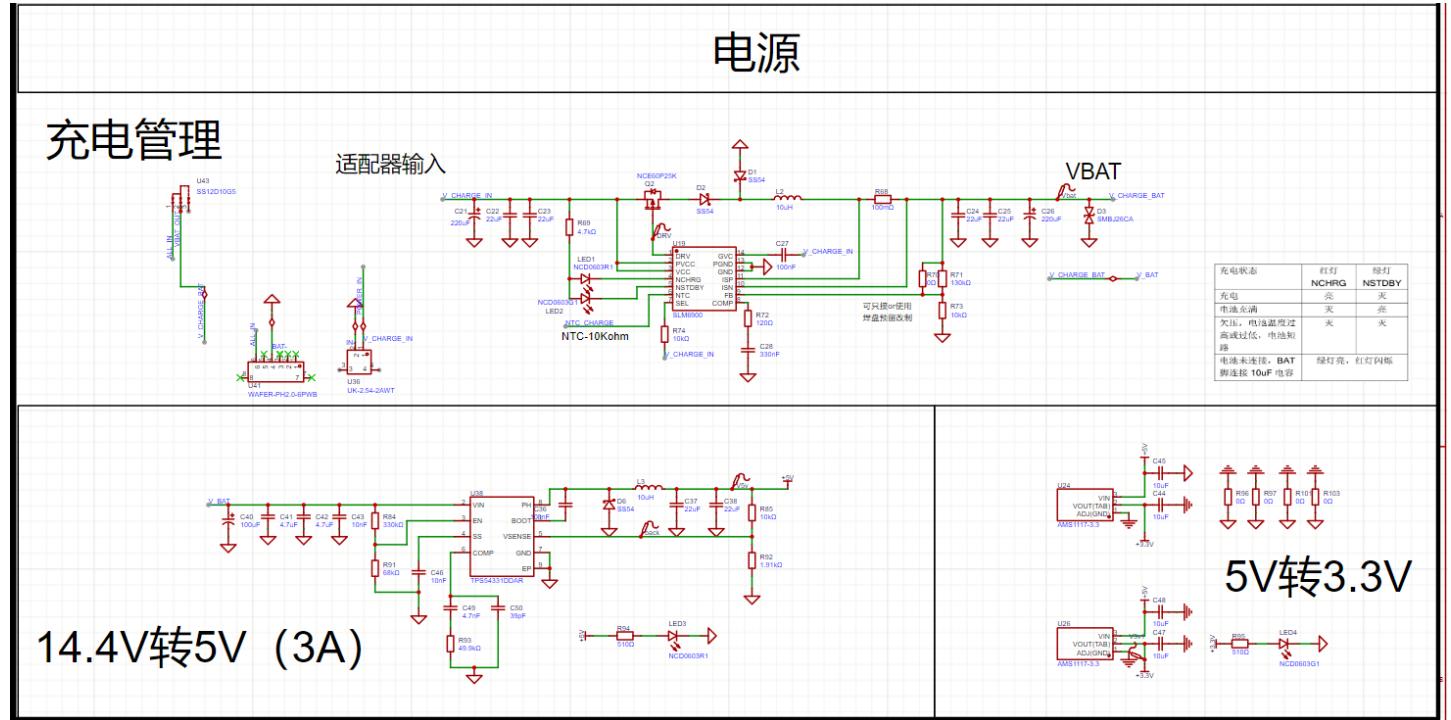
红外等传感器接口设计遵循分域供电与抗干扰原则。模拟量传感器信号在进入 MCU 前通过 RC 滤波与必要的缓冲电路进行预处理，以降低噪声与抖动。

3.2.2 电源管理系统（BMS与稳压链路）

系统支持**12–24 V 宽压输入**，可兼容 3–6 串锂电池组或外接适配器供电，适应不同使用场景下的能源配置需求。整体电源架构采用二级稳压体系进行分域供电：电机驱动 H 桥或其他功率级负载，风机，扫刷用直流锂电池供电，之后通过主降压级 Buck 稳压至约 5 V，提供大于3A的输出能力，用于各类传感器供电；最终通过低噪声 LDO 生成 3.3 V / 1.2A 逻辑电源，专用于 MCU、通信芯片及核心数字电路，确保逻辑域电源的稳定与纯净。

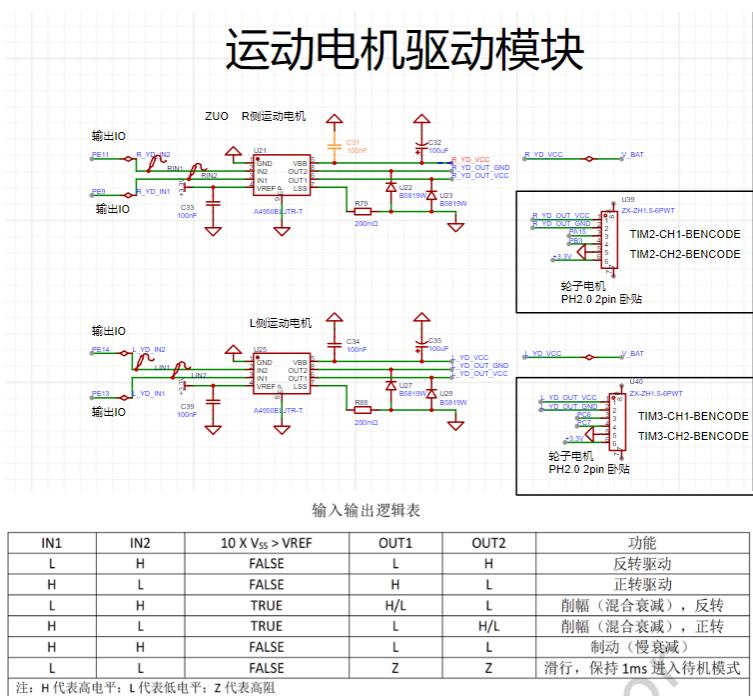
在安全与监测方面，系统集成了完善的保护机制，包括针对 14.4 V 电池组设置的欠压保护（13.2 V）与过压保护（16.8 V），以及 6–8 A 级别的过流保护策略。同时引入 NTC 温度采样与电池健康状态估计，用于异常工况预警。电压与电流检测部分采用 ADC 配合运放差分采样电路，实现对电池与系统负载状态的高精度监测。

充电系统支持最大**1.5 A / 19 V** 输入，采用标准 CC/CV 充电策略，并在电路布局上实现充电回路与系统供电回路的物理隔离，从源头上避免充电过程中的纹波与噪声耦合至控制 MCU 或敏感模拟电路。



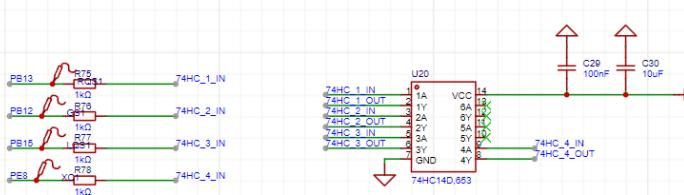
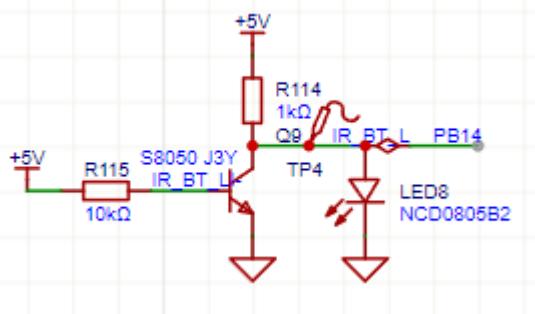
3.2.3 电机驱动与功率接口

运动电机采用差速驱动结构，核心驱动器件选用 **A4950 全桥直流电机驱动芯片**。该芯片支持典型的 **IN1/IN2 方向控制配合 PWM 调速方式**，能够直接与 MCU 定时器输出接口对接，实现电机正反转及转速控制。A4950 驱动模块工作在输入电源的电机功率电源域，由锂电池直接供电，并通过去耦电容与地分区设计抑制电机换相与 PWM 开关带来的电源噪声，避免对逻辑控制与传感器电路产生干扰。本小组自行升级原装编码器后，使原来的单向编码器成为双向编码器，反馈信号直接接入 MCU 硬件定时器，采用双倍频解码方式，并与 **1000 Hz 刷新率的 PID 闭环控制**相结合，使底盘在直线行走过程中保持良好的左右一致性和运行稳定性，同时提高里程计分辨率与低速控制精度。



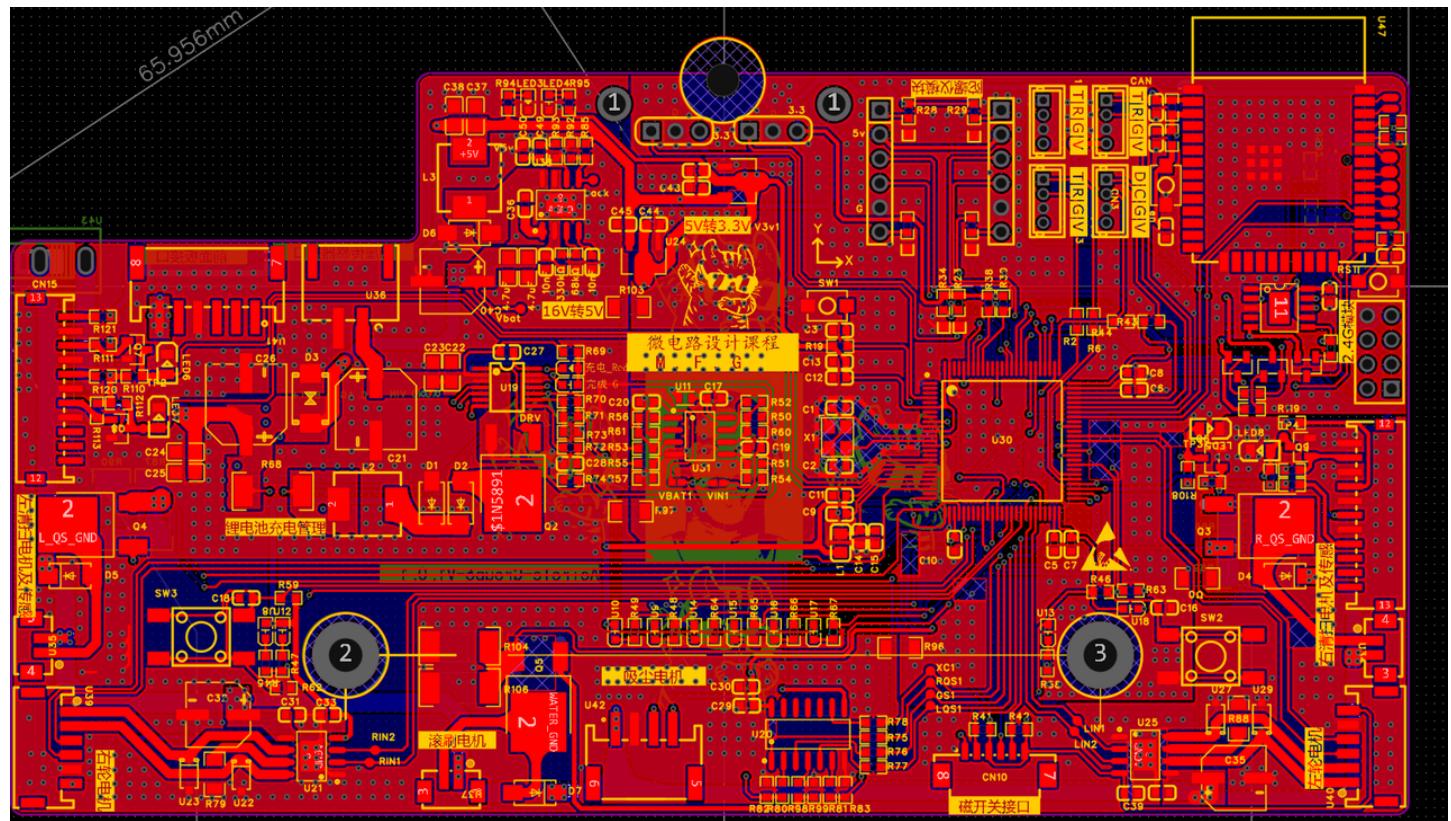
在功率扩展方面，系统预留 4 路独立的大电流输出接口，使用简单的三级管加 74HC14D 将单片机控制信号转换为数字信号，提升阻抗的同时兼具一定的驱动电流。其中 2 路用于清扫滚刷电机（峰值电流 2~3 A），1 路用于吸尘风机（3~5 A），另 1 路作为水泵或备用风机接口，为不同功能模块提供充足的

功率支持。PCB设计中对功率走线进行重点优化，采用大面积铺铜与等效线宽不小于120 mil的加宽走线，并通过多过孔并联（Via stitching）方式增强电流承载能力与散热性能，降低局部温升风险。



3.2.3 接口与机械兼容性设计

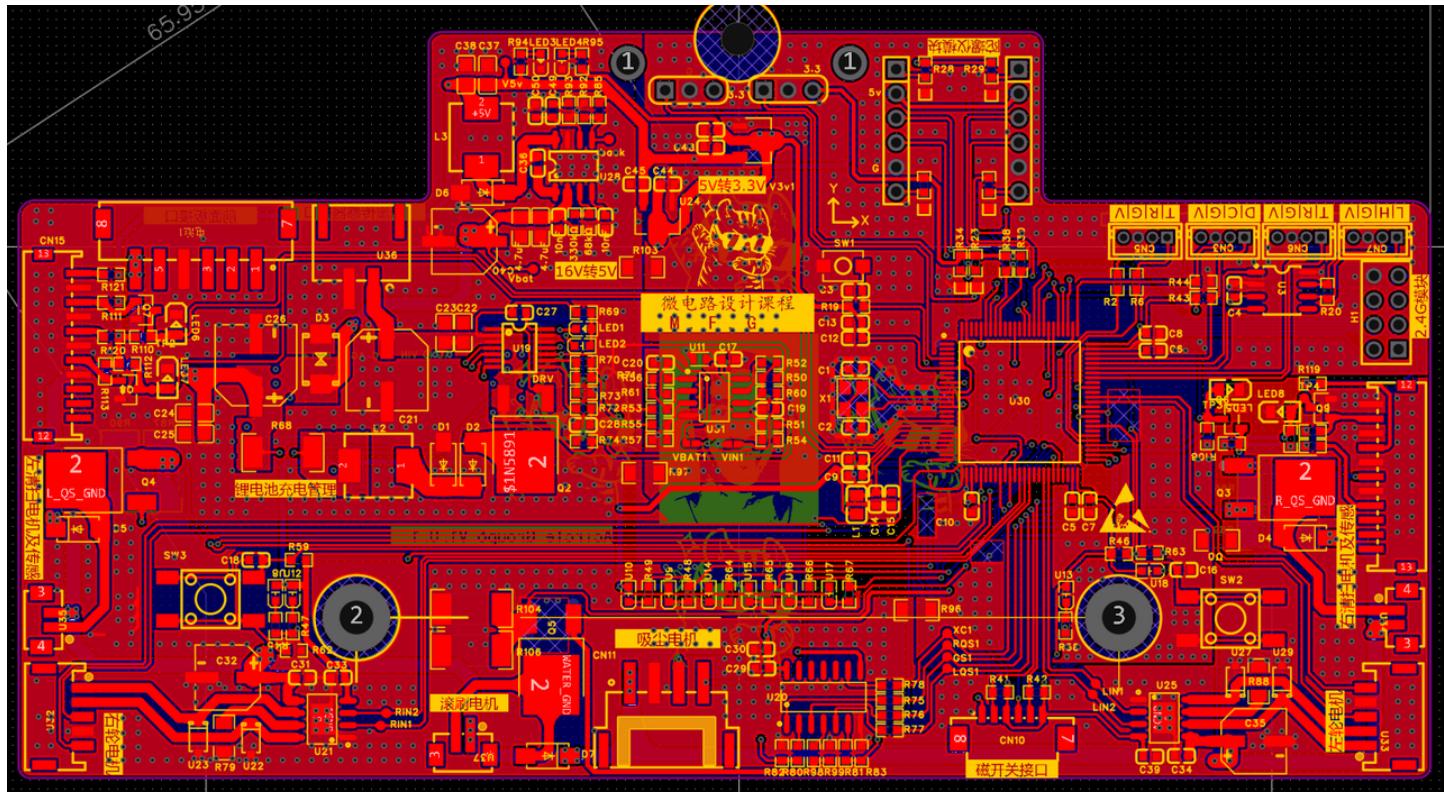
在结构与装配层面，电路设计充分考虑与底盘机械结构的协同关系。各类接口位置依据底盘空间与线束走向进行优化布局，避免装配后产生线缆应力集中或传感器遮挡问题。同时，PCB板载安装孔位与底盘结构实现共面定位，确保安装过程中的尺寸一致性与机械稳定性，减少装配干涉与长期振动带来的隐患。通过将主控、执行机构与各类传感器在电源与信号层面进行合理划分，系统在保证实时控制性能的同时，有效降低了相互干扰风险，为整机的稳定运行和后续功能扩展提供了良好的硬件基础。



3.3 PCB设计迭代

3.3.1 版本V1.0 总结

V1.0 版本以功能验证与系统联通为主要目标，完成了核心功能链路的跑通以及主控、电机驱动、传感器与通信模块之间的硬件原型互联，为后续系统级优化奠定了基础。在实际装配与连续运行测试过程中，也暴露出若干工程层面的关键问题。部分接口位置与底盘机械结构存在装配冲突，线束走向不够合理；功率走线在高负载工况下散热能力不足，局部温升偏高；地线回流路径尚未完全优化，存在回流绕行现象；整体布局虽然紧凑，但在高功率与高频信号并存的情况下，潜在的信号耦合与干扰风险较为突出。这些问题在原型阶段可接受，但已成为制约系统可靠性与可扩展性的主要因素。



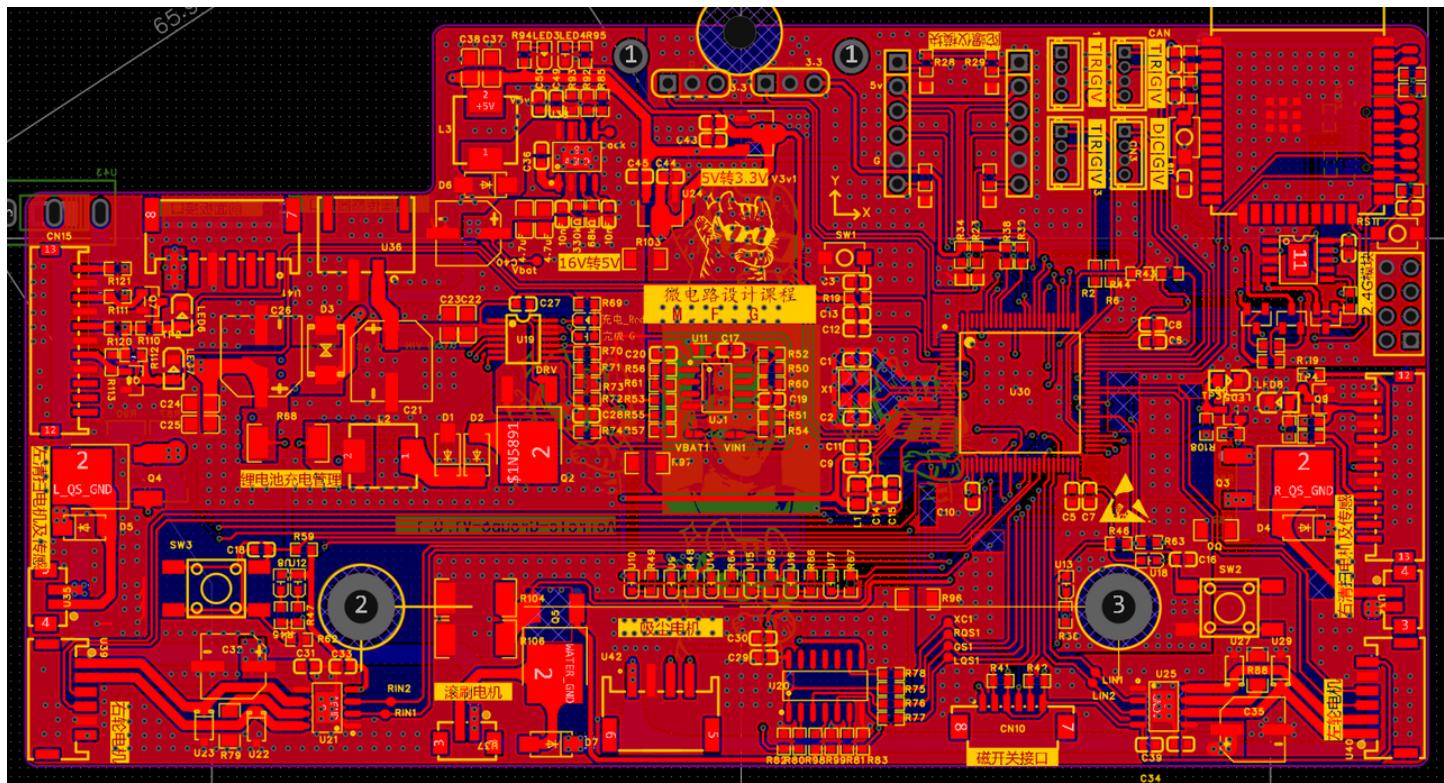
3.3.2 版本V2.0 优化策略与结果

针对 V1.0 版本中暴露的问题，V2.0 在不改变系统总体架构的前提下，对电路布局、接口规划与抗干扰设计进行了系统性重构。首先，基于底盘装配约束对接口进行重定位与重新排布，使线束路径更加顺畅，显著降低了装配应力与遮挡风险。在通信架构上，将通信协处理功能进一步下沉，新增 ESP32 核心电路，用于承载雷达等高数据量通信任务，从硬件层面减轻主控与实时控制链路的负担。

在抗干扰设计方面，V2.0 对地平面进行连续铺铜处理，避免分割地带来的回流不确定性；同时明确划分功率域与信号域，关键控制与通信信号与高功率走线保持大于 10 mm 的物理隔离距离。PWM 与编码器等时序敏感信号采用等长走线策略，并在关键信号旁增加地线屏蔽与回流引导，有效降低串扰与共模干扰风险。

针对功率完整性问题，主电源走线在 V2.0 中全程采用大面积铺铜，并引入散热过孔矩阵以增强热扩散能力。实测与评估结果表明，在相同负载条件下，电源网络的电流承载能力较 V1.0 提升约 40–60%，温升情况明显改善。

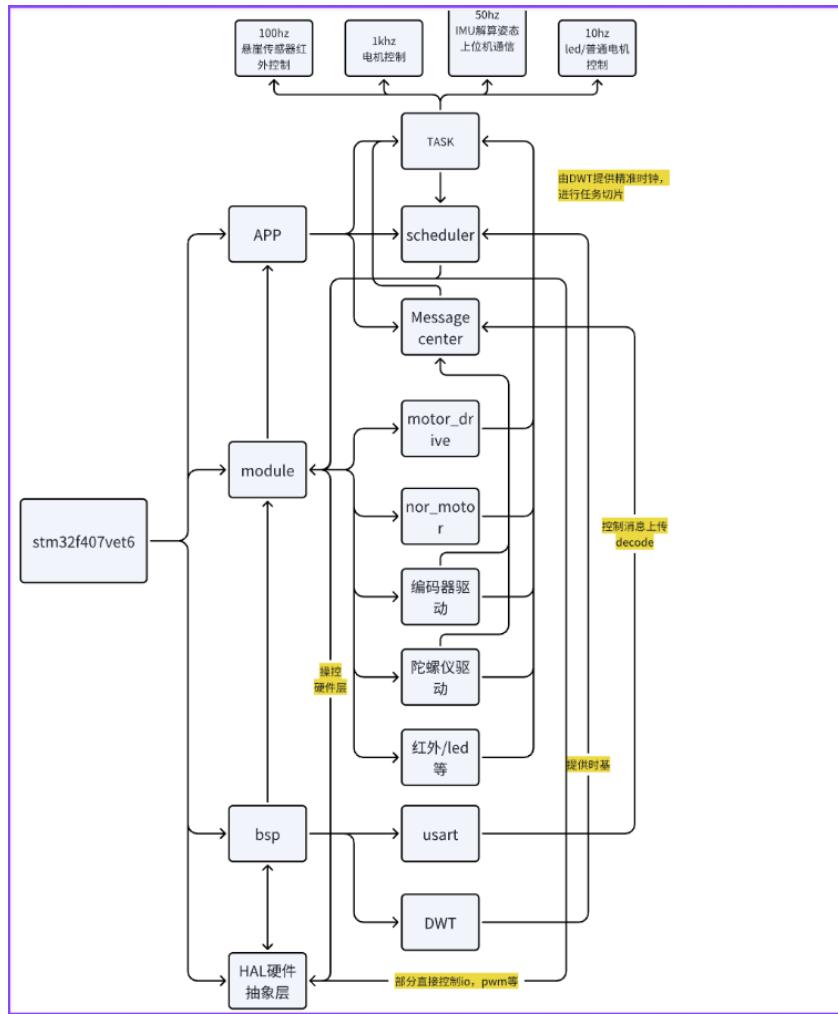
在功能层面，V2.0 版本预留了更多扩展接口，包括语音交互模块以及蓝牙、WiFi、LED 与红外等外设接口，以及ESP32核心电路直接置于板上降低接线的不稳定性。为后续功能升级与产品化迭代提供了充足的硬件冗余。



3.4 软件程序框架

3.4.1 下位机程序框架设计与实现

系统软件采用分层解耦的程序框架设计，自上而下划分为 **APP 层**、**Module 层**、**BSP 层** 与 **硬件抽象层 (HAL)**，在保证代码结构清晰性的同时，兼顾实时性与可扩展性。底层硬件平台为 STM32F407VET6，当前硬件抽象层由 STM32 HAL 库接管，负责 GPIO、定时器、USART、PWM 等基础外设的初始化与最底层驱动访问，为上层提供统一、稳定的硬件接口。



在此之上，BSP 层对具体硬件资源进行二次封装，屏蔽不同外设配置细节，为系统提供标准化的外设访问接口，如串口通信、DWT 高精度计时、编码器计数与 PWM 输出等。BSP 层不参与业务逻辑，仅承担“硬件适配层”的职责，保证上层逻辑与具体硬件实现解耦。

Module 层作为系统的功能中间层，封装了各类功能驱动与算法模块，例如 PID，低通滤波，滑动平均等等，还包括电机驱动逻辑函数、编码器驱动转换函数、舵机驱动、红外与 LED 控制等。

- **PID 控制：** buck_control.c / motor_pid.c，支持参数在线更新与积分限幅、抗饱和回卷。
- **里程计解算：** encoder_odometry.c，支持中断回调与位姿积分。
- **IMU 传感器驱动：** JY901.c（串口解析、姿态角输出、加速度角速度融合）。
- **运动学解算：** nor_motor_ctrl.c (cmd_vel → 轮速转换、加减速S曲线或梯形速度规划)。

所有模块均以统一接口形式对外暴露，在标准化的 APP 层中的 TASK 文件集成控制任务函数，最后使用软件任务调度器按照不同频率调用，实现功能复用与独立维护。通过该层设计，系统可以在不影响上层业务逻辑的前提下灵活替换或扩展具体功能模块。)

APP 层负责系统整体业务逻辑与控制策略的组织，主要通过调用 Module 层接口完成运动控制、状态管理与行为决策。为满足实时控制需求，系统实现了一套轻量级的时间片任务管理器 (scheduler)，基于 DWT 提供的高精度时基，对不同任务按照固定频率进行调度与执行，实现多任务的确定性运行。当前系统中，高频电机控制与 PID 闭环运行于 1000 Hz，传感器采样、通信与状态管理任务则运行于较低频率，形成清晰的实时优先级划分。

- 任务调度策略：
 - IMU解算 100 Hz
 - 传感器轮询 20 Hz
 - Odom积分 200–500 Hz
 - 电机PID 1000 Hz
 - 控制指令监听 50–200 Hz
 - 系统监控 10 Hz
- 采用**时间切片与优先级抢占结合策略**，确保控制任务最高优先级。

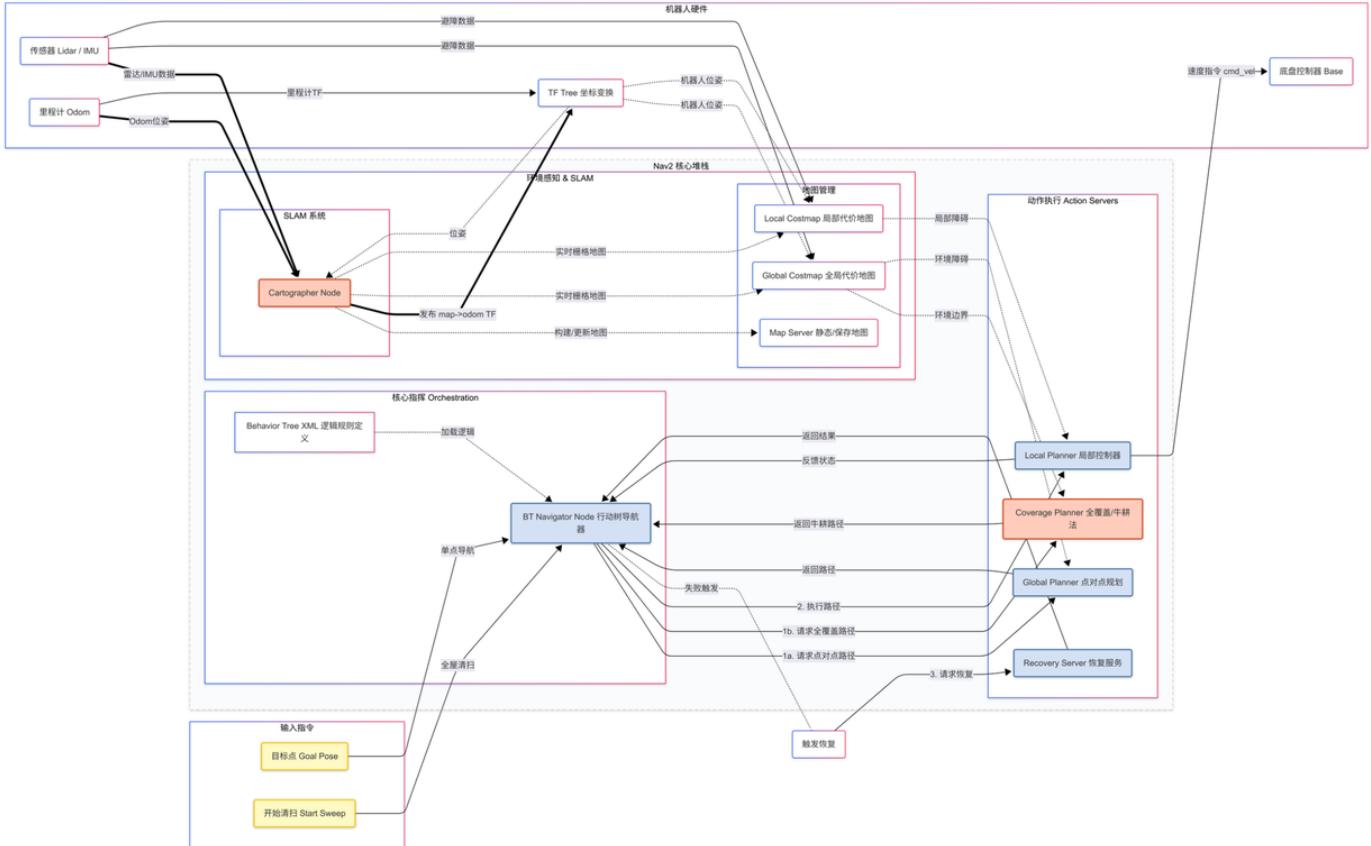
所有跨模块的数据与通信消息统一汇聚至 Message Center，由其负责消息的接收、解码、缓存与分发，避免模块间的直接耦合调用。该机制不仅提升了系统的结构清晰度，也为后续功能扩展和通信协议升级提供了良好的基础。在运动控制方面，系统升级为双向编码器反馈结构，并结合 1000 Hz 高刷新率 PID 控制回路，使底盘在直线行走过程中具备极高的对称性与稳定性，实际运行中几乎无可观测偏移，充分验证了该程序框架在实时性与工程可靠性方面的有效性。

3.4.2 软件框架核心能力

- 确定性硬实时闭环
- 模块低耦合、功能可替换
- 安全事件广播机制
- 支持掉线恢复与模式记忆（非重置）
- 通信协处理与控制任务隔离
- 所有通信消息的汇聚点，提供统一的收发接口，维护消息队列，保证数据的实时性与一致性。

第 4 章 机器人导航算法设计

导航算法是机器人的核心竞争力，决定了其“怎么走”和“走得好不好”。本章将详细阐述从底层传感器融合、中层SLAM建图与定位，到上层路径规划与运动控制的完整技术实现。



4.1 多源传感器融合与高精度里程计 (Odom)

为了解决单一传感器在长时间运行中不可避免的累积漂移（Drift）问题，本项目确立了以多源传感器融合为核心的高精度里程计方案。该方案的核心目标是利用扩展卡尔曼滤波（EKF）算法，将轮式里程计（Wheel Odometry）与惯性测量单元（IMU）数据进行紧耦合，从而输出高频率、高精度的机器人位姿估计，为后续的SLAM建图与导航提供可靠的 odom 坐标系基准。在传感器融合之前，必须深入分析两者的误差模型特性作为EKF协方差矩阵设计的物理基础。轮式编码器在平坦地面上对线速度和位移的测量在短时间内非常精准，但其劣势在于对旋转极其敏感，一旦出现车轮打滑、空转或地面不平，通过左右轮速差计算出的航向角（Heading/Yaw）会产生剧烈漂移，且该误差会随时间指数级累积。相比之下，9轴IMU中的陀螺仪对角速度的测量具有极高的动态响应，且完全不受车轮打滑影响，能提供非常准确的短时旋转增量，尽管其加速度计进行二次积分求位移会产生发散性的漂移，不适合直接用于长距离位置估计。

基于上述互补特性，系统采用扩展卡尔曼滤波（EKF）来处理非线性的机器人运动模型，整个系统状态估计过程分为“预测”与“更新”两个主要步骤。首先定义需要估计的机器人状态向量 x_k ，它包含了机器人在世界坐标系下的位置 p_x, p_y 、航向角 θ 、线速度 v_x, v_y 以及角速度 ω_z 。在预测步骤中，利用上一时刻的最优估计值和编码器提供的控制量，通过差分驱动模型的运动学方程推演当前时刻的先验状态。由于运动模型涉及三角函数等非线性关系，算法需计算雅可比矩阵 F_k 将系统在当前状态点附近进行线性化近似，并计算随着运动而扩大的预测状态不确定性，即协方差传递。随后的更新步骤则基于IMU观测数据，当IMU数据到达时，算法计算观测残差，即比较IMU测量的角速度或加速度与预测状态的差异。这一过程的核心在于卡尔曼增益 K_k 的计算，算法会根据预测协方差矩阵 P_k 和观测噪声协方差矩阵 R_k 自动计算权重。若设置较大的编码器模型方差以反映轮子易打滑的特性，同时设置较小的IMU方差以信任陀螺仪精度，则增益 K_k 会自动偏向于信任IMU的数据来修正航向角 θ 和角速度 ω_z ，最后利用该增益修正状态向量，得到最终的后验位姿输出。

我们需要估计的机器人状态向量 x_k 包含以下分量：

$$x_k = [p_x, p_y, \theta, v_x, v_y, \omega_z]^T$$

其中：

- p_x, p_y : 机器人在世界坐标系下的位置。
- θ : 机器人的航向角 (Yaw) 。
- v_x, v_y : 机器人的线速度。
- ω_z : 机器人的角速度。

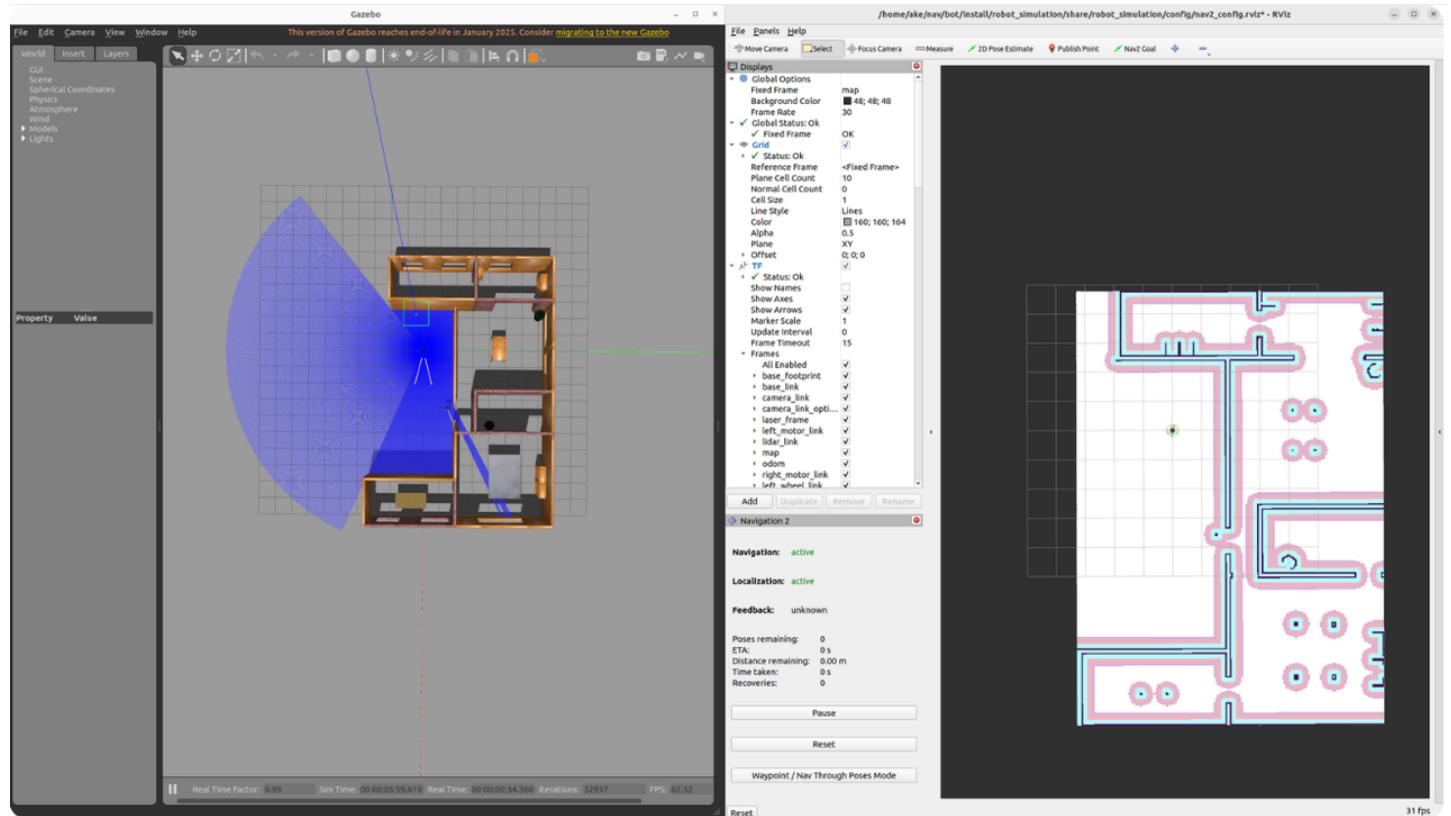
在工程实现的细节上，系统特别处理了时间同步与噪声调优问题。鉴于IMU通常运行在100Hz-200Hz，而编码器可能在20Hz-50Hz，融合前需通过时间戳对齐，并利用线性插值对低频数据进行上采样，以确保融合时序的严格一致。噪声协方差矩阵的调优则通过设定过程噪声 Q 来反映模型自身的不确定性（如适当调大运动模型中位移项的方差以应对地面摩擦不均匀），并通过静态测试标定IMU的零偏和白噪声方差来填充测量噪声 R 。此外，系统还引入了异常值剔除机制，设定马哈拉诺比斯距离阈值，当碰撞等导致IMU剧烈震荡产生过大偏差时，拒绝执行该次EKF更新以防止位姿突变。经过EKF融合后的里程计模块具备了显著的旋转鲁棒性、平滑性与低漂移特性，即使机器人在原地打滑旋转，IMU也能精准捕捉航向变化修正编码器错误，且有效滤除了微分带来的高频量化噪声，显著降低了长时间运行下的闭环误差，为Lidar SLAM提供了高质量的运动先验。

4.2 SLAM建图、定位与自主探索

本系统的空间认知模块致力于构建一套集“高精度环境感知”、“主动未知区域探测”与“鲁棒自身定位”于一体的综合系统。其技术路线通过图优化SLAM算法保证地图的一致性，利用边界探索算法实现自动化的环境覆盖，并结合自适应概率定位确保机器人在复杂环境中的位姿可靠性。在建图算法选型上，为了解决传统粒子滤波SLAM在长距离建图中存在的内存占用高及易出现“回环闭合失败”的问题，本系统选用了Cartographer 作为核心建图引擎。该算法采用了扫描与子图匹配机制，不同于传统的点云对地图匹配，它将连续的激光雷达扫描帧聚合成一系列独立的子图，新采集的扫描数据通过相关性扫描匹配插入到当前的活动子图中，这种局部匹配方式显著降低了短时累积误差。与此同时，后台线程会周期性地运行稀疏位姿图优化，当系统检测到当前观测数据与历史子图高度重合即检测到回环时，算法会构建约束边，并通过非线性最小二乘法优化整个位姿图。这种机制能够瞬间修正长距离行驶产生的漂移，强制闭合由于累积误差导致的地图“重影”或“断裂”，从而生成几何一致性极高的全局栅格地图。

为了实现“由零开始的完全自主建图”，系统引入了基于边界的主动探索策略，使机器人不再依赖人工遥控，而是自主规划路径以覆盖未知区域。该策略首先实时分析栅格地图，提取出“已知自由区域”与“未知区域”之间的交界线即“边界”，并对提取出的边界点进行聚类和滤波，剔除过小或噪声引起的伪边界以生成有效的候选目标点集合。随后，系统通过效用函数对每个候选边界点进行多维度评分评估，评分权重综合考虑了信息增益（即前往该处能开垦多少新地图）与导航成本（即路径长度）。基于Next-Best-View (NBV) 策略，系统动态选择效用最高的目标点作为下一个导航路点。此外，系统还设计了黑名单机制，若某个边界点因障碍物遮挡或路径规划失败导致长时间无法到达，系统会将其加入黑名单，强制机器人转向探索其他区域，避免陷入死循环。

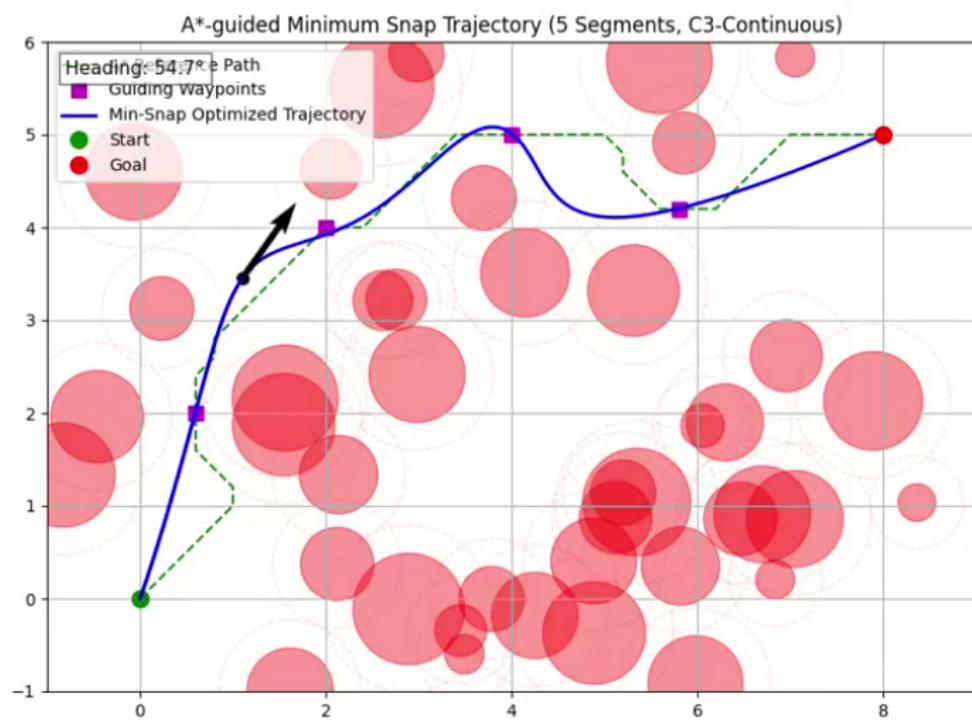
在定位方面，当建图完成或已有地图时，系统利用自适应蒙特卡洛定位（AMCL）算法来解决机器人的“绑架问题”和动态环境下的定位漂移。该算法基于粒子滤波机制，维护一个代表机器人可能位姿的粒子集合，通过重采样过程根据激光雷达观测数据与地图的匹配度保留高权重粒子并剔除低权重粒子，使粒子云迅速收敛至真实位置。为了平衡精度与算力，算法采用了KLD采样策略，根据当前的定位信度动态调整粒子数量：定位准确时减少粒子数，迷失时自动增加粒子数以扩大搜索范围。一旦检测到定位完全丢失，系统还可触发全局重定位模式，向全地图随机散布粒子，通过后续运动观测迅速重新收敛到正确位姿，实现了无需人工干预的“自我找回”。

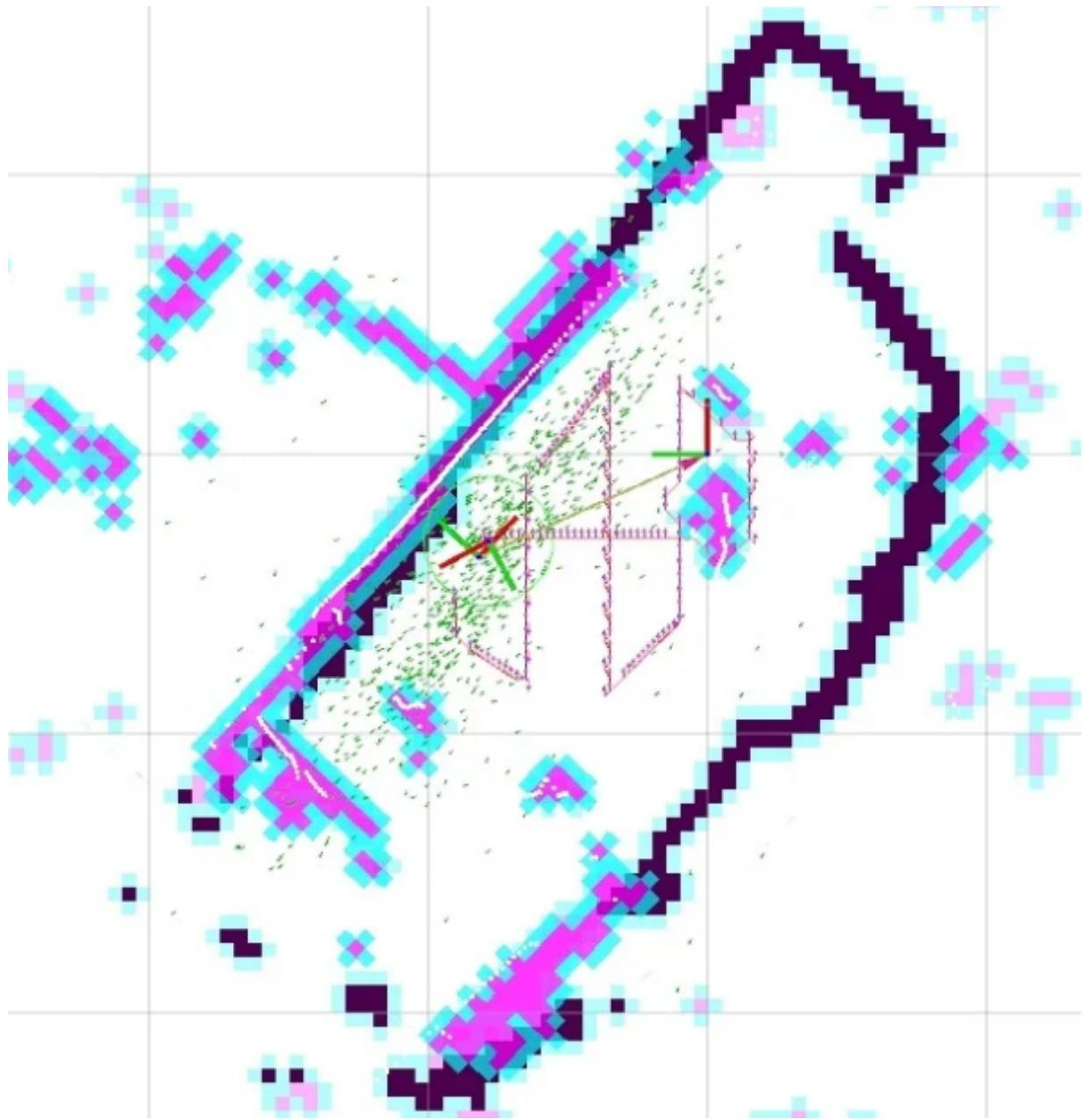


4.3 路径规划与运动控制（Nav2 Stack）

基于ROS2 Navigation2框架，本项目实现了复杂的行为树（Behavior Tree）任务管理，并针对扫地机器人独特的运动特性，对全局和局部规划器进行了深度定制。在全局规划层面，我们针对传统A*算法搜索路径存在大量尖锐拐点、导致机器人频繁急停和旋转的问题，进行了算法改进与多项式拟合优化。系统在A*搜索出的初始路径关键点基础上，引入了7次多项式（Minimum Snap）轨迹优化算法，通过构建高阶多项式曲线 $P(t) = c_0 + c_1t + \dots + c_7t^7$ 连接路径点，确保了轨迹在位置、速度、加速度乃至加加速度（Jerk）上的连续性。这种优化生成的轨迹极其平滑，极大减少了运动过程中的顿挫感，提升了清扫效率与电机寿命。此外，针对清洁任务需求，系统还实现了基于单调多边形分解技术的全覆盖路径规划（Coverage Planner），能将不规则房间分解为若干单调区域并在区域内生成平行的弓字形扫描轨迹。

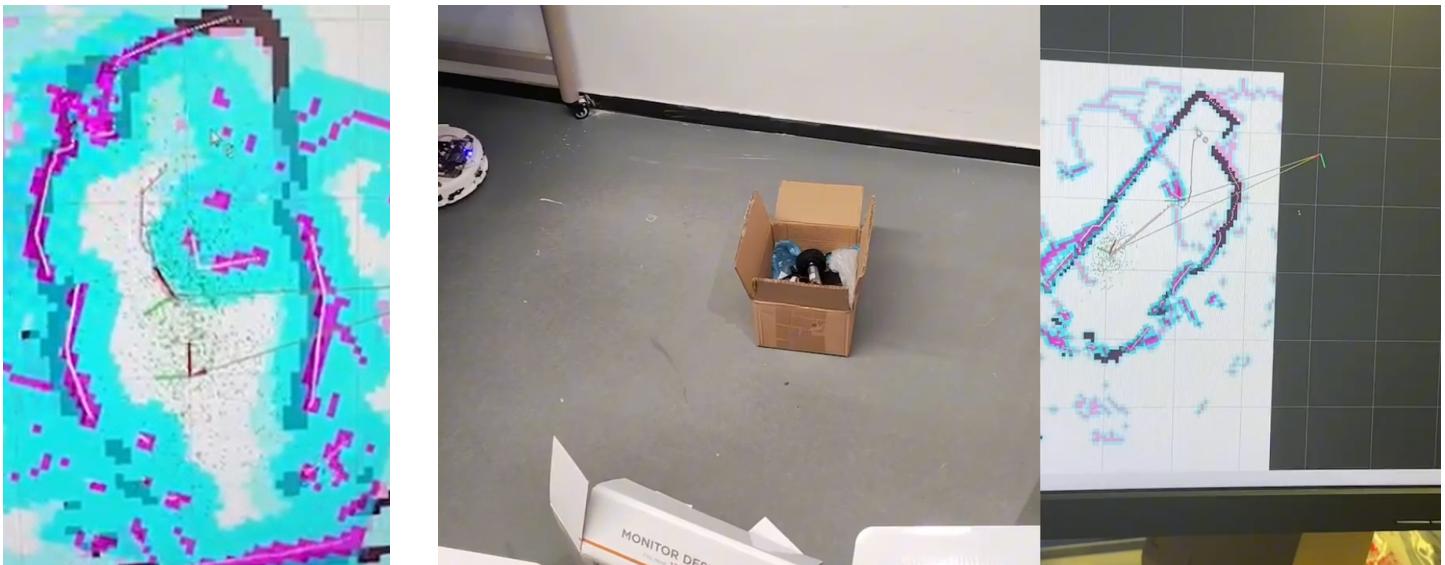
Figure 1





在局部规划（Local Planner）方面，针对复杂的家庭动态环境，如行走的宠物或突然出现的人，我们经过深入对比最终舍弃了 ROS2 默认的 DWA 算法，选用了性能更优的 TEB (Time Elastic Band) 算法。选择 TEB 的核心原因在于其具有全局观与极佳的路径平滑度，不同于 DWA 仅关注未来几秒局部最优的“短视”与轨迹顿挫，TEB 基于图优化技术同时优化局部路径上的所有点，能提前规划绕行路线并保证运动丝滑，且通过显式优化时间参数具备了强大的动态避障能力。

从数学原理上看，TEB 将路径规划建模为一个稀疏的超图优化问题，利用 g2o 库求解。状态变量定义为一个由 n 个位姿点 s_i 和 $n - 1$ 个时间间隔 ΔT_i 组成的序列 B 。目标函数 $f(B)$ 旨在最小化各项约束的加权总和，包括防止偏离预设路线的路径跟随约束、基于外罚函数法的障碍物斥力约束、确保轨迹物理可执行的运动学与动力学约束（速度与加速度限制），以及针对差速驱动机器人的非完整约束。基于这一模型，TEB 展现出了独特的时间弹性与空间形变特性：当检测到动态障碍物时，算法会自动调整时间间隔 ΔT_i 以规划出“减速等待”或“加速通过”的策略；同时，面对障碍物的斥力，整条轨迹如同橡皮筋一般发生弯曲变形，利用优化器的全局视野瞬间将轨迹“弹”到障碍物另一侧，从而实现了流畅的动态绕行与脱困。



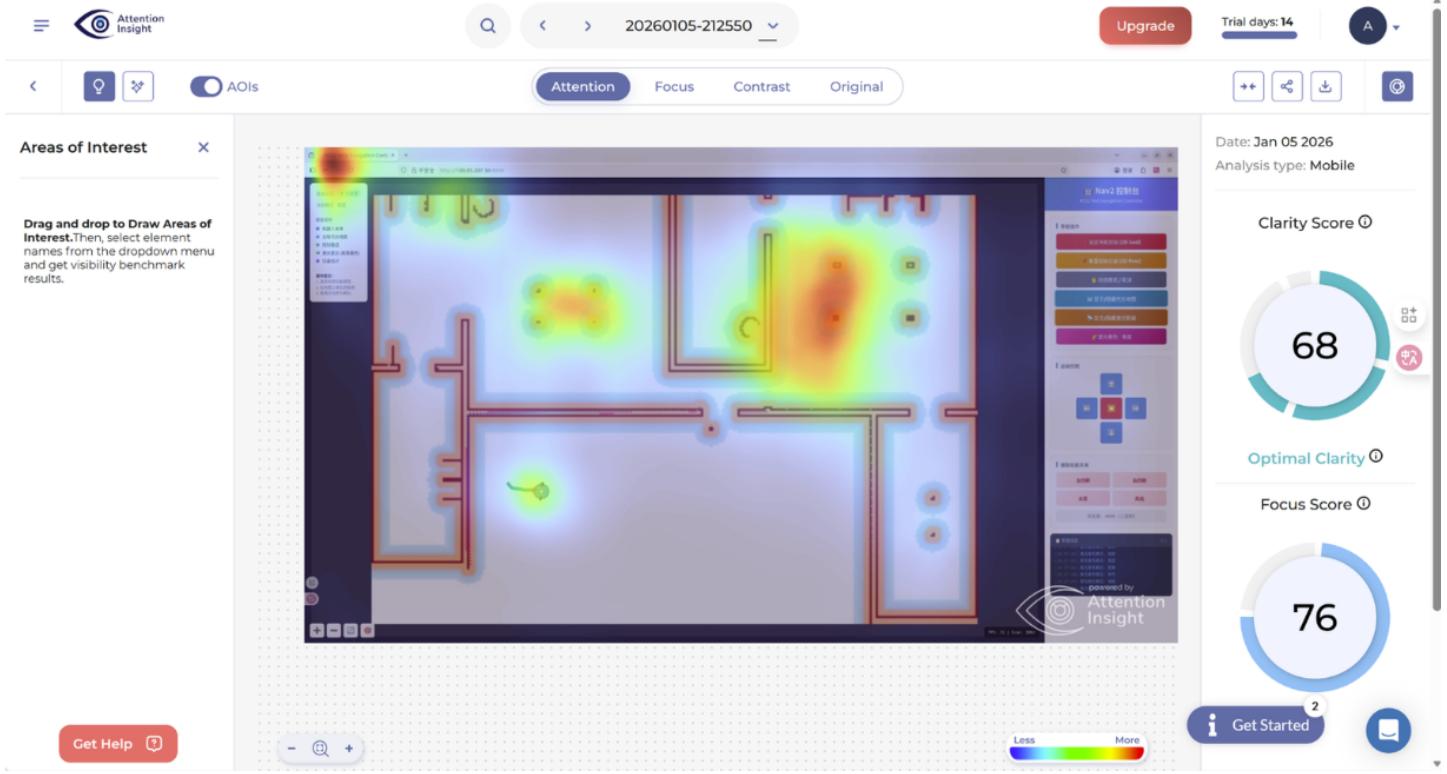
第5章 人机交互（UI）与智能化

本项目致力于打造“所见即所得”的现代化交互体验，从视觉和听觉两个维度提升用户体验。

5.1 轻量化 Web 交互终端与人机工效优化

本系统摒弃了传统基于 QT 或本地 APP 的重客户端模式，采用了 B/S (Browser/Server) 架构构建了一套零门槛、跨平台、响应式的机器人控制系统。该设计的核心理念在于实现人机交互 (HCI) 与底层控制系统的完全解耦，不仅显著降低了部署成本，更通过人因工程学验证了操作的高效性。在技术架构上，系统采用前后端分离的通信机制，打通了 Web 浏览器与 ROS2 DDS 数据空间的壁垒。前端基于 HTML5/CSS3/JavaScript 开发，利用 roslibjs 库作为核心通信接口，并使用 Canvas API 高效绘制高频更新的地图数据与激光点云，避免了 DOM 操作带来的性能瓶颈；中间件层部署 rosbridge_server 作为 WebSocket 网关，负责将前端 JSON 指令序列化为 ROS2 消息，反之将后端 Topic 转换为 JSON 推送给前端；后端控制层则负责接收指令驱动底盘执行任务。

界面设计遵循“所见即所得”原则，集成了沉浸式实时可视化与多模态运动控制两大功能流。用户不仅可以在网页端实时看到重构的 2D 占有栅格地图，还能看到叠加的实时位姿与采用距离自适应着色渲染的激光雷达点云，直观判断障碍物距离。控制方面，系统提供了 Touch-to-Go 导航（点击地图任意位置自主规划路径）、虚拟摇杆（针对精细操作场景）以及外设执行器的独立控制功能。为了确保操作员在高认知负荷下的操作准确性，我们利用 Attention Insight 工具对 UI 布局进行了基于 AI 的眼动追踪预测分析。分析结果显示，界面的清晰度评分（Clarity Score）达到 68，表明视觉复杂度控制在最佳区间，有效降低了认知负荷；聚焦度评分（Focus Score）达到 76，验证了关键交互元素具有极高的视觉显著性。热力图分析进一步证实用户的视觉注意力自然集中在地图监控区与状态反馈区，符合人类视觉浏览的“F型”模式，验证了“左侧状态监视、右侧操作控制、中间全局地图”布局策略的科学性与合理性。



5.2 离线语音交互

为了进一步提升交互便捷性，系统采用了离线语音模块并本地部署了AI蒸馏模型。该方案的最大优势在于隐私保护与低延迟，无需联网即可在本地识别语音指令，响应速度极快且有效保护用户隐私。功能上，用户可以通过语音实现精细控制，如直接下达“向前走”、“向左转”等行驶指令，或启停清扫部件。此外，系统支持场景化复合指令，例如喊出“开始智能扫地”，机器人即会自动启动复杂的清扫逻辑。整个交互过程具备完整的闭环反馈链路，即“识别-执行-语音播报反馈”，例如识别到指令后会播报“正在执行”并随即执行动作，从而极大提升了操作的确定性和用户的掌控感。

6.2 总结与收获

本项目立足于软硬件协同设计的理念，在完成扫地机器人全向运动、电源管理及多传感器驱动等基础功能之上，通过引入ROS2导航框架、嵌入式AI语音及Web交互技术，成功拓展了系统的智能化水平。

1. 项目创新点总结

根据项目实际开发成果，主要创新点体现在以下四个维度：

- **硬件传感融合与里程计优化：**针对低成本底盘定位不准的问题，进行了硬件级的深度改造。将单向编码器升级为双向编码器，并结合IMU（惯性测量单元）与EKF（扩展卡尔曼滤波）算法进行多传感器融合，显著提升了里程计在复杂环境下的累积精度，为精准建图奠定了基础。
- **针对性导航算法改进：**在实现2D激光雷达Cartographer建图与Nav2导航的基础上，针对扫地机器人的运动特性进行了算法优化。采用了改进的A*全局路径规划算法，并配合TEB局部控制器，增强了机器人在动态环境下的避障性能与导航平滑度，实现了“一键（一声）导航”与区域覆盖清扫。
- **本地化AI语音交互：**摒弃了传统的在线语音方案，实现了本地部署的AI语音模型。支持自定义唤醒词与离线语音交互，在保护用户隐私的同时，解决了网络延迟问题，使机器人能够作为“家庭好帮手”进行即时响应。

- 跨平台轻量化控制架构：构建了基于STM32与ESP32的高效通信链路，实现了底层控制与上层网络的解耦。开发了Web端跨平台控制界面，用户无需安装App即可通过网页实现远程监控与控制，极大地提升了人机交互（HUI）的友好度与便捷性。

2. 心得与体会

- 系统工程观的建立：深刻理解了“解耦”在复杂机电系统设计中的关键作用，合理的任务分配（如STM32负责实时控制，ESP32/上位机负责交互与计算）能显著提升系统的鲁棒性。
- 全栈开发能力的提升：掌握了从硬件原理图绘制、PCB打样，到嵌入式驱动编写，再到ROS2上层算法移植与参数调优的全流程开发技能。
- 理论与实践的鸿沟跨越：在调试过程中，认识到理论算法（如TEB轨迹优化）落地到实际物理样机时，必须充分考虑电机死区、通信带宽及传感器噪声等物理约束，参数调优是连接理论与工程的桥梁。

综上所述，本项目圆满完成了预定的设计要求，并形成了一台具备高完成度、集成“语音+视觉+导航”功能的工程样机。