

## 【基于 RK3588 的新能源空地智能小型机器人】

### 摘要

本项目研发了一款融合地面越野与垂直起降飞行能力的智能救援机器人，突破传统救援受地形限制的瓶颈。通过高度集成的红外成像、激光雷达探测技术，实现复杂环境下的顺利运行以及生命体征精准定位；搭载国产 RK3588 芯片与 DeepSeek 大模型，支持自主决策与 3D 场景实时回传。项目已完成原型机实验验证，未来将优化能源系统与 AI 算法以及机械结构，提升复杂场景适应性和稳定性。

### 第一部分 作品概述

#### 1.1 功能与特性

本项目研发的空地一体智能救援机器人，融合地面越野与垂直起降飞行能力，突破传统救援地形限制。搭载 AgraPro 深度相机、MLX90640 红外模块及 YDLIDAR 4ROS 激光雷达，实现 15 米内生命体征精准定位，障碍物识别精度达  $\pm 5\text{cm}$ 。

基于国产 RK3588 芯片与 DeepSeek 大模型本地化部署，构建端侧智能决策中枢，响应延迟  $< 0.5$  秒，支持无网络环境自主作业。采用折叠式四旋翼设计，空地模式切换时间  $< 5$  秒，地面可应对 30cm 障碍与 45° 斜坡，飞行高度达 30 米，形成“探测 - 定位 - 决策”闭环，提升复杂场景救援效率。

#### 1.2 应用领域

该机器人核心应用于地震、火灾、洪水等自然灾害救援，可深入废墟、高温浓烟或洪涝区域，完成被困人员定位、灾情勘察与物资投递。在危化品泄漏等事

---

故现场，能替代人员执行高危环境探测，降低救援风险。

拓展场景涵盖城市公共安全（大型活动安保巡逻）、电力巡检（高压线路故障检测）、林业监测（火灾隐患识别与非法砍伐巡查）及地质勘探、考古挖掘、海关关卡（抵近货船检查）等。

通过预设专用任务模式，适配不同场景需求，填补人力难以触及的复杂危险环境救援空白。

### 1.3 主要技术特点

技术上实现三大突破：一是机构创新，单体集成地面越野与垂直起降功能，5 秒内完成模式切换，减少多设备协同依赖；二是智能决策升级，国产 RK3588 芯片搭载 DeepSeek 大模型，端侧推理速度 15FPS，决策延迟 0.5 秒，核心技术国产化率 $>80\%$ ；三是多模态感知融合，融合深度视觉、热成像与激光雷达数据，构建三维场景认知，复杂地形路径规划成功率超 95%。

基于 ROS2 系统搭建低延迟控制框架，采用改进 A\* 与 RRT 算法，平衡救援效率与装备安全，为智能救援提供国产化解决方案。

### 1.4 主要性能指标

性能指标	参数详情
控制模式	单体自主决策
响应延迟	$<0.5$ 秒

端侧推理速度	15FPS
路径规划时间 (复杂废墟场景)	小于 2 秒，成功率超 95%
功能集成度	全功能一体机(融合地面越野与垂直起降飞行能力)
国产化率	>95%
空地模式切换时间	小于 5 秒
飞行高度	达 30 米
最大飞行速度	20km/h
飞行续航 (满电状态)	≥25 分钟
底盘越障能力	可通过高度 30cm、坡度 45° 障碍物，连续通过 10 次通过率 100%
障碍物识别精度	±5cm
激光雷达距离精度	±2cm
生命体征探测距离	红外模块最远 11 米，多模态融合实现 15 米
基于 ROS2 的嵌入式系统响应延迟	低于 100ms

## 1.5 主要创新点

- (1)单体集成空地一体功能，5 秒内完成模式切换，减少多设备协同依赖，提升独立作战效能。
- (2)国产 RK3588 芯片与 DeepSeek 大模型端侧协同，决策延迟 0.5 秒，核心技术自主可控。
- (3)多模态感知融合，实现立体场景认知，复杂环境信息获取更完整准确。首创“探测 - 定位 - 传输 - 决策”闭环流程，提升黄金 72 小时救援效率。

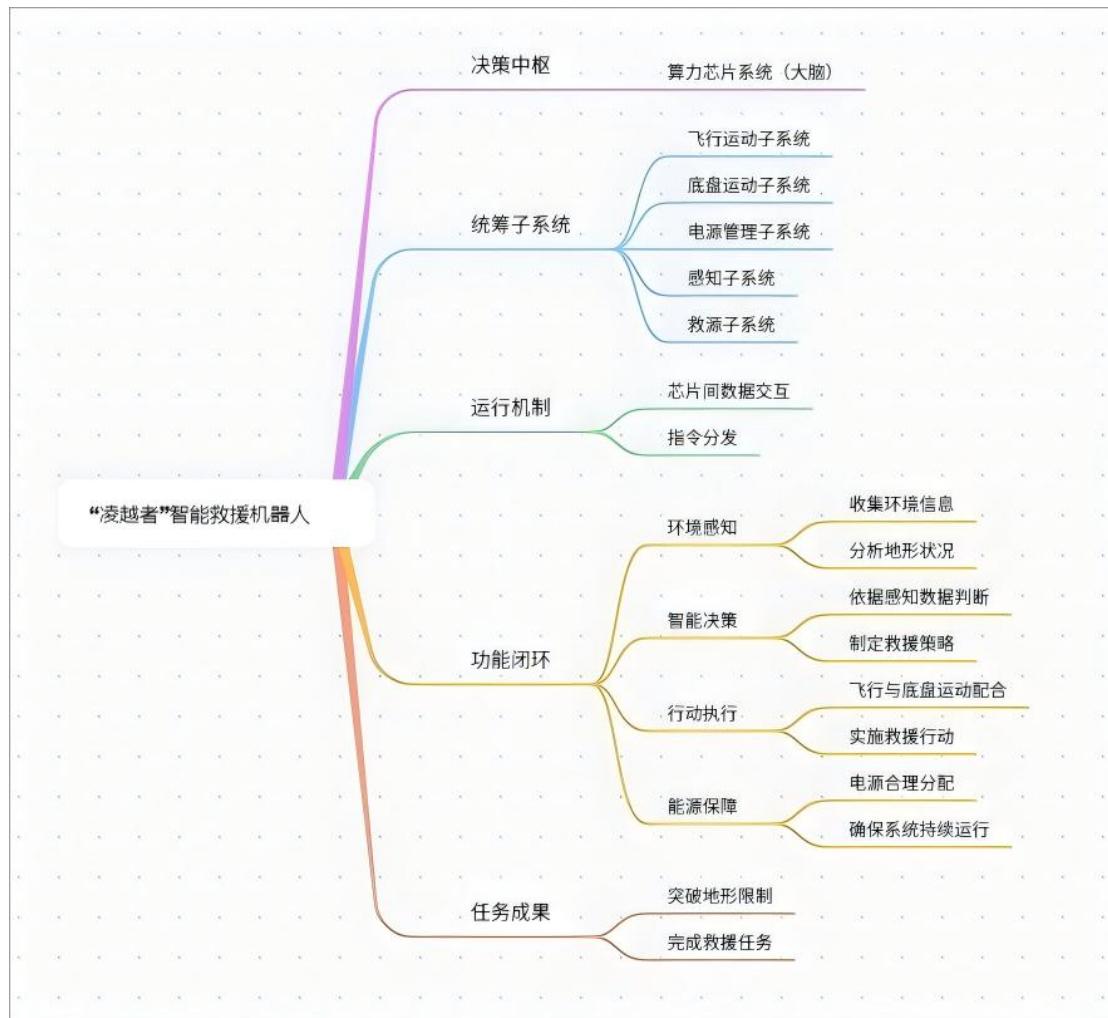
## 1.6 设计流程

标题	2025-03-01	2025-04-13	2025-05-26	2025-07-08	2025-08-20
需求分析与方案设计		03.01 - 04.30			
硬件研发与算法迭代			05.01 - 07.30		
模拟测试与优化完善				08.01 - 09.30	

设计流程自 3 月 30 日启动，分三阶段推进：需求分析与方案设计阶段（3-4 月），通过调研明确救援场景需求，完成机器人总体架构与技术方案设计；硬件研发与算法迭代阶段（5-7 月），完成底盘、飞行模块加工及传感器集成，基于 ROS2 开发算法并部署大模型；模拟测试与优化完善阶段（至今），开展模块调试与联调。

## 第二部分 系统组成及功能说明

### 2.1 整体介绍



## 1、“凌越者”智能救援机器人系统架构说明

“凌越者”作为融合空陆两栖能力的智能救援机器人，采用模块化架构适配复杂救援场景，各系统围绕“任务执行 - 数据交互 - 能源供给”协同运作，分为六大系统，以下从整体框架及模块关联展开说明：

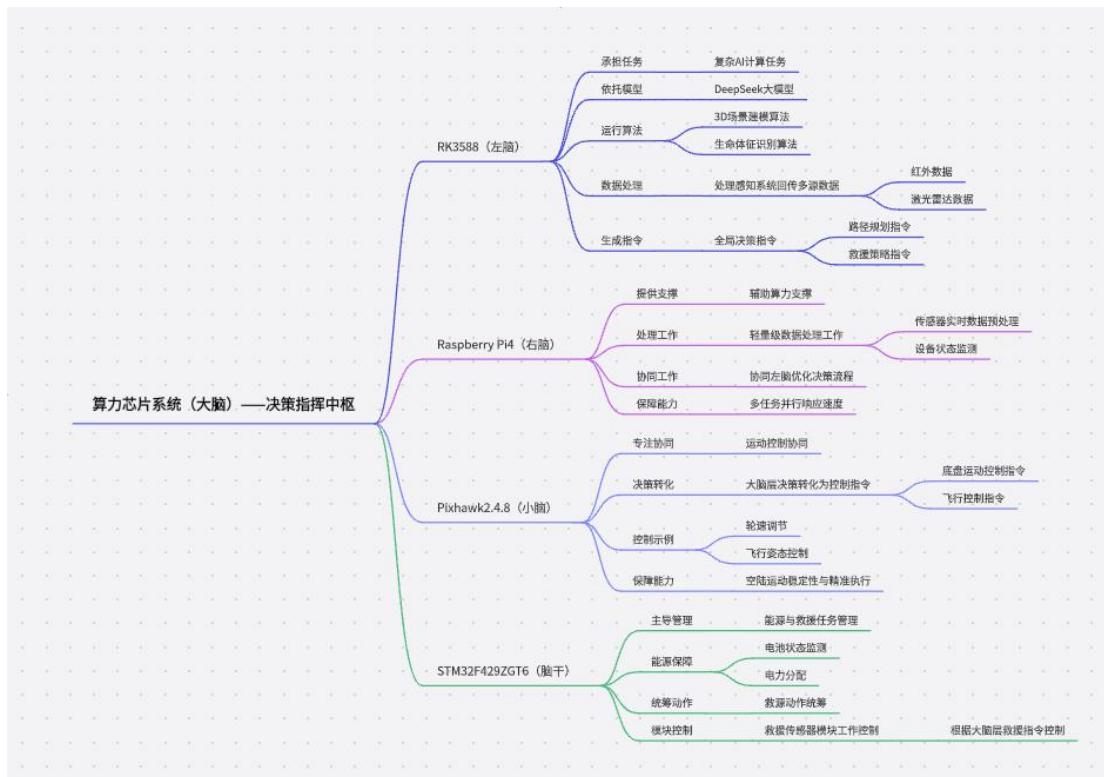
### 2.1.1 整体框架与核心逻辑

系统以“算力芯片系统（大脑）”为决策中枢，统筹飞行运动、底盘运动、电源管理、感知、救源等子系统。通过芯片间数据交互与指令分

发，实现“环境感知 - 智能决策 - 行动执行 - 能源保障”闭环，突破地形限制，完成救援任务。

## 2.2 子模块功能及关联关系

### (2.2.1) 算力芯片系统（大脑）——决策指挥中枢



- RK3588（左脑）：承担复杂 AI 计算任务，依托 DeepSeek 等大模型，运行 3D 场景建模、生命体征识别算法。处理感知系统回传的红外、激光雷达等多源数据，生成路径规划、救援策略等全局决策指令。

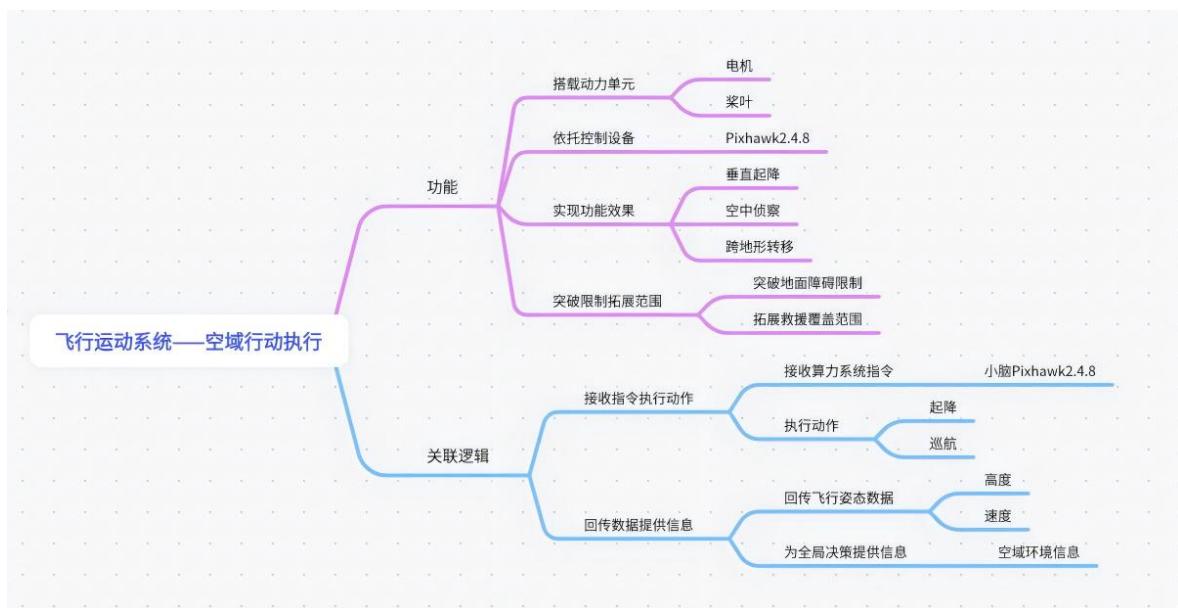
- Raspberry Pi4（右脑）：提供辅助算力支撑，负责传感器实时数据预处理、设备状态监测等轻量级数据处理工作，协同左脑优化决策流程，保障多任务并行时的响应速度。

- Pixhawk2.4.8（小脑）：专注运动控制协同，解析大脑层决策，

转化为底盘运动与飞行控制的精确指令，如轮速调节、飞行姿态控制等，保障空陆运动的稳定性与精准执行。

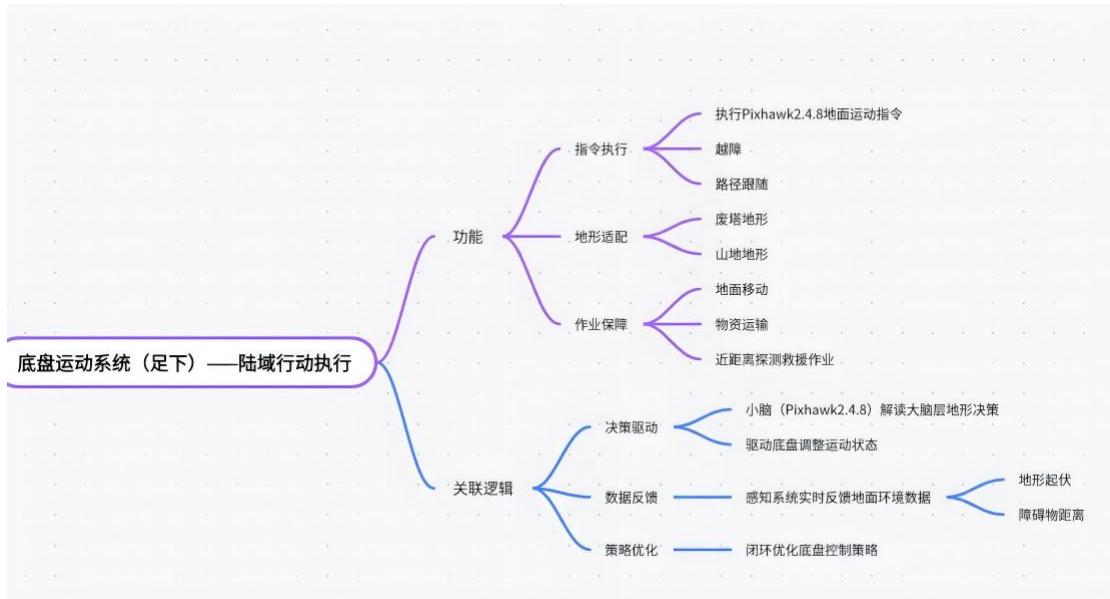
- STM32F429ZGT6（脑干）：主导能源与救援任务管理。一方面，监测电池状态、分配电力，保障系统能源供给；另一方面，统筹救源动作，将根据大脑层救援指令控制机器人的救援传感器模块工作。

## （2.2.2）飞行运动系统（飞行）——空域行动执行



- 功能：搭载多旋翼动力单元（电机、桨叶），依托 Pixhawk2.4.8 控制，实现垂直起降、空中侦察与跨地形转移，突破地面障碍限制，拓展救援覆盖范围。 - \*\*关联逻辑\*\*：接收算力系统（小脑 Pixhawk2.4.8）的飞行指令，执行起降、巡航动作；同时向感知系统回传高度、速度等飞行姿态数据，为全局决策提供空域环境信息。

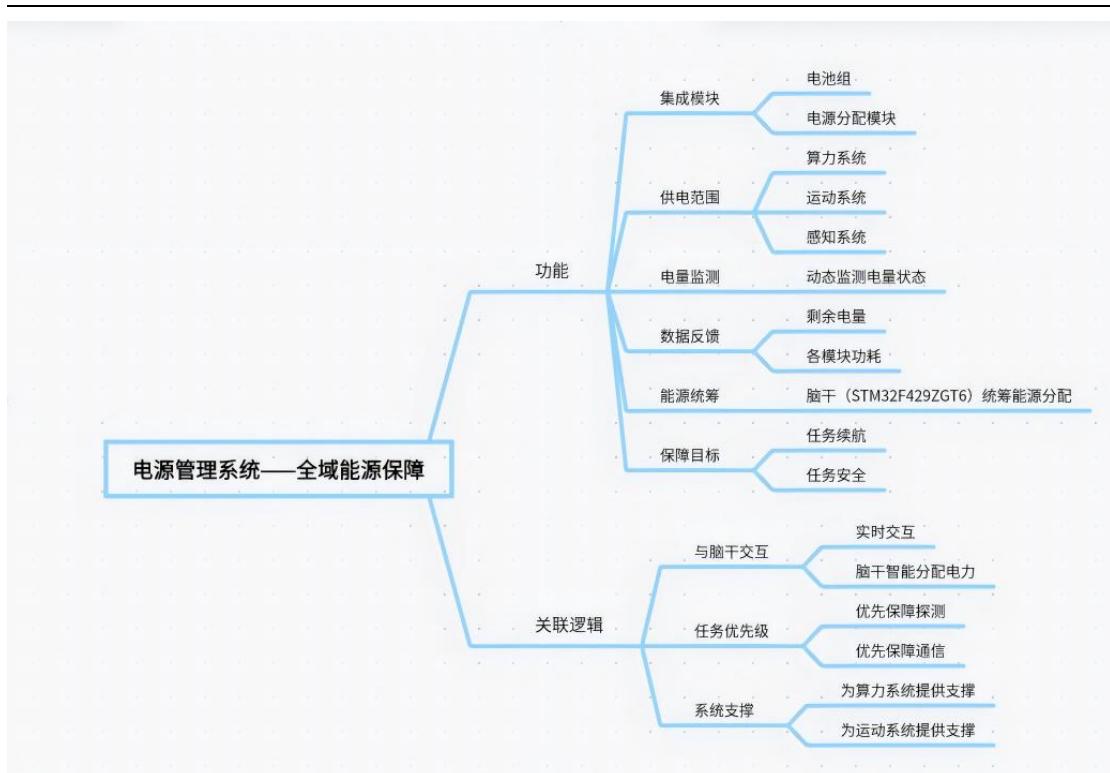
## （2.2.3）底盘运动系统（足下）——陆域行动执行



- 功能：通过越野悬架、驱动轮组，执行 Pixhawk2.4.8 输出的地面运动指令，越障、路径跟随等，适配废墟、山地等复杂地形，保障机器人地面移动与物资运输、近距离探测等救援作业。

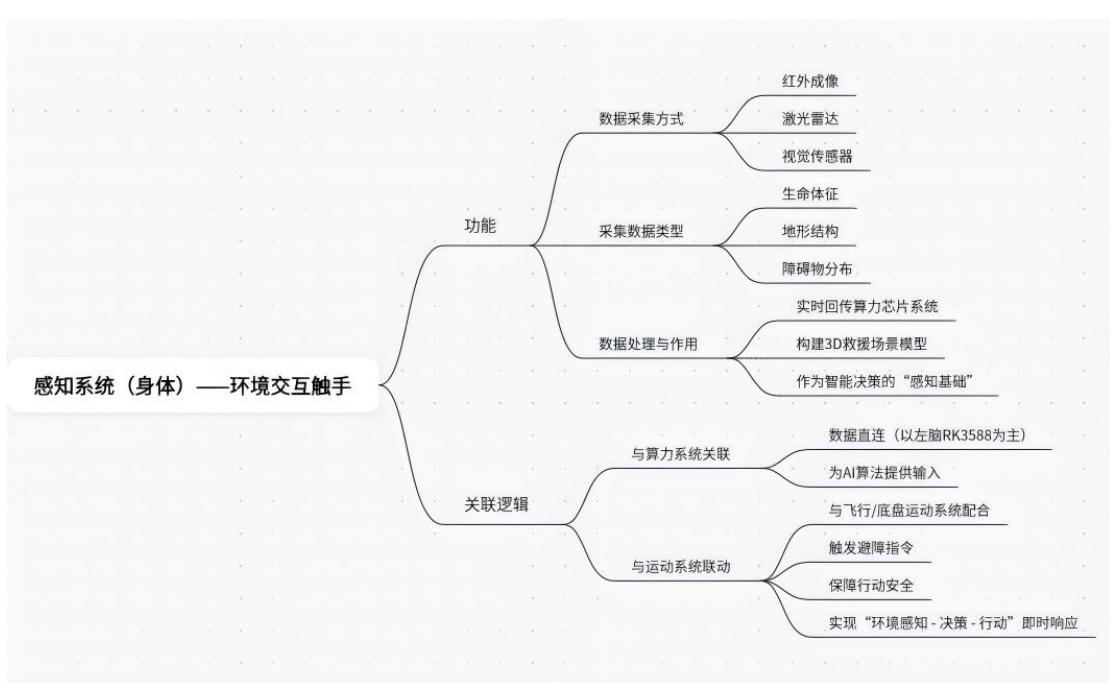
- 关联逻辑：小脑（Pixhawk2.4.8）解析大脑层地形决策，驱动底盘调整运动状态；感知系统实时反馈地形起伏、障碍物距离等地面环境数据，闭环优化底盘控制策略。

## （2.2.4）电源管理系统（能源）——全域能源保障



- 功能：集成电池组、电源分配模块，为算力、运动、感知等全系统供电，动态监测电量状态，向 STM32F429ZGT6（脑干）反馈剩余电量、各模块功耗等能源数据，由脑干统筹能源分配，保障任务续航与安全。
- 关联逻辑：作为“能源中枢”，与脑干（STM32F429ZGT6）实时交互，脑干依据电量及任务优先级（如优先保障探测、通信）智能分配电力；同时为算力、运动等系统稳定运行提供基础支撑。

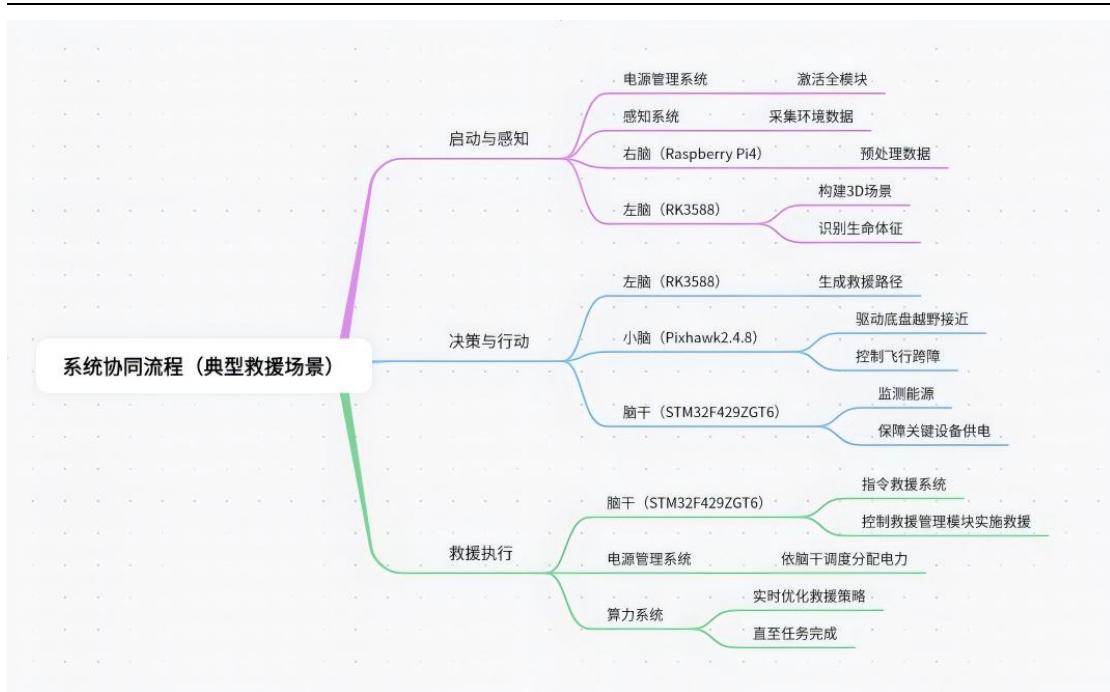
## （2.2.5）感知系统（身体）——环境交互触手



- 功能：通过红外成像、激光雷达、视觉传感器等，采集空陆双域环境数据，如生命体征、地形结构、障碍物分布等，实时回传算力芯片系统，构建 3D 救援场景模型，是智能决策的“感知基础”。

- 关联逻辑：数据直连算力系统（以左脑 RK3588 为主），为 AI 算法提供输入；同时与飞行 / 底盘运动系统联动，如触发避障指令，保障行动安全，实现“环境感知 - 决策 - 行动”即时响应。

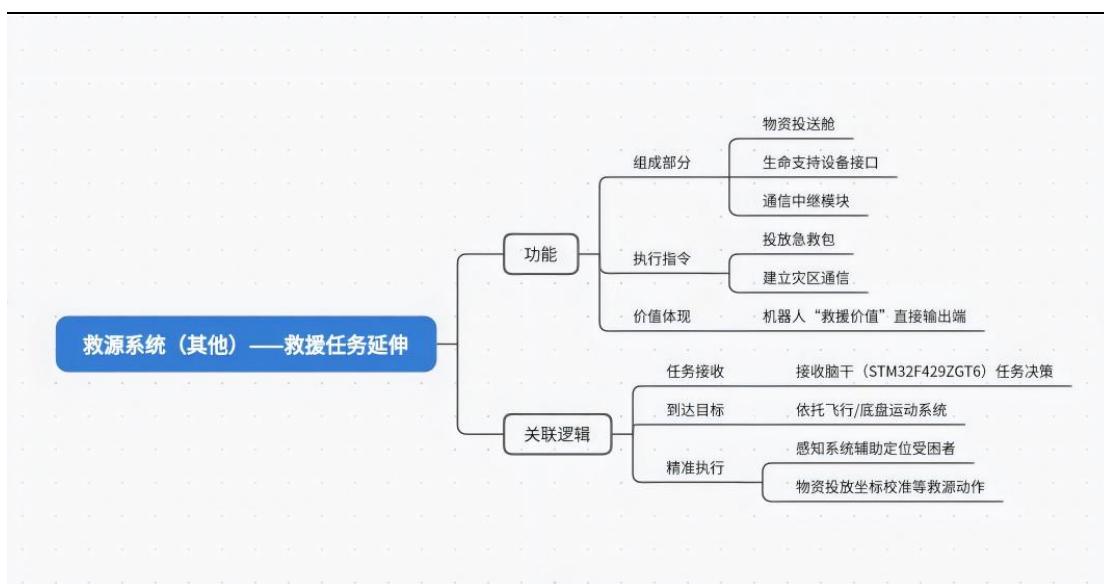
## (2.2.6) 救源系统（其他）——救援任务延伸



- 功能：涵盖物资投送舱、生命支持设备接口、通信中继模块等，执行 STM32F429ZGT6（脑干）下达的救援指令，如投放急救包、建立灾区通信等，是机器人“救援价值”的直接输出端。

- 关联逻辑：接收脑干（STM32F429ZGT6）任务决策，依托飞行 / 底盘运动系统到达目标点；感知系统辅助定位受困者，精准执行物资投放坐标校准等救源动作。

## 2.3 系统协同流程（典型救援场景）



- 启动与感知：电源管理系统激活全模块，感知系统采集环境数据，经右脑（Raspberry Pi4）预处理后，左脑（RK3588）构建3D场景、识别生命体征。
- 决策与行动：左脑生成救援路径，小脑（Pixhawk2.4.8）驱动底盘越野接近、控制飞行跨障；脑干（STM32F429ZGT6）同步监测能源，保障关键设备供电。
- 救援执行：到达目标区，脑干（STM32F429ZGT6）指令救源系我统命令控制救援管理模块实施救援；电源管理系统依脑干调度分配电力，算力系统实时优化救援策略，直至任务完成。

“凌越者”以模块化架构实现“空陆协同、智能决策、精准救援”，各系统通过数据交互与功能互补，突破传统救援边界，为复杂场景下的生命救助提供全流程技术支撑。

## 2.2 硬件系统介绍

### 2.2.1 硬件整体介绍：

本项目研发的空地一体智能救援机器人硬件系统采用高度集成化设计，融合地面越野与垂直起降飞行功能，通过多模态传感器与国产化核心芯片构建完整的感知、决策与执行体系，具体硬件组成及特性如下：

1、本体结构模块 地面越野底盘：采用四越野轮结构，搭配悬挂自适应调节系统，可应对斜坡、台阶、碎石等复杂地形，确保地面移动的通过性。

四旋翼飞行模块：采用折叠式碳纤维材质，收纳时贴合机身顶部，展开后可实现垂直起降与空中悬停，飞行高度达 30 米，最大飞行速度 20km/h。

空地模式切换机构：通过快速插拔式接口连接地面与飞行模块，切换时间小于 5 秒，适配灾害现场的场景快速转换需求。

### 2、感知系统模块

AgraPro 深度相机：分辨率达 4K，帧率 60fps，深度探测范围 0.2-10 米，配合 SLAM 算法实时生成环境地图，构建三维场景深度感知。

MLX90640 红外模块：热成像分辨率  $32 \times 24$ ，测温范围-40°C-300°C，可穿透浓烟、黑暗环境，最远识别 11 米内的生命体征热信号。

YDLIDAR 4ROS 激光雷达：基于 32 位 ARM Cortex-M4 处理器，支持 360°全向扫描，最远探测距离 30 米，距离精度 $\pm 2\text{cm}$ ，角分辨率 0.25°，可快速构建高精度三维点云模型，实时更新地形与障碍物信息。

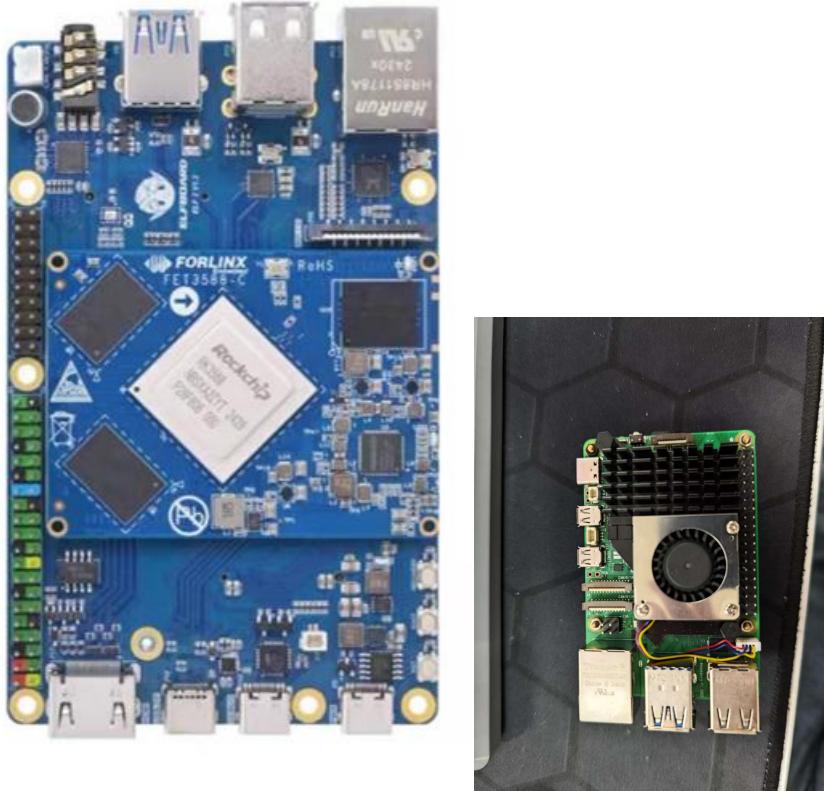


### 3. 核心计算与控制系统模块

国产 RK3588 芯片：作为硬件计算核心，支持 DeepSeek 大模型本地化部署，实现端侧推理速度 15FPS，保障低延迟自主决策。

基于 ROS2 的嵌入式系统：采用模块化设计，实现传感器数据采集、算法处理、执行器控制的解耦，支持多线程并行处理，响应延迟低于 100ms。

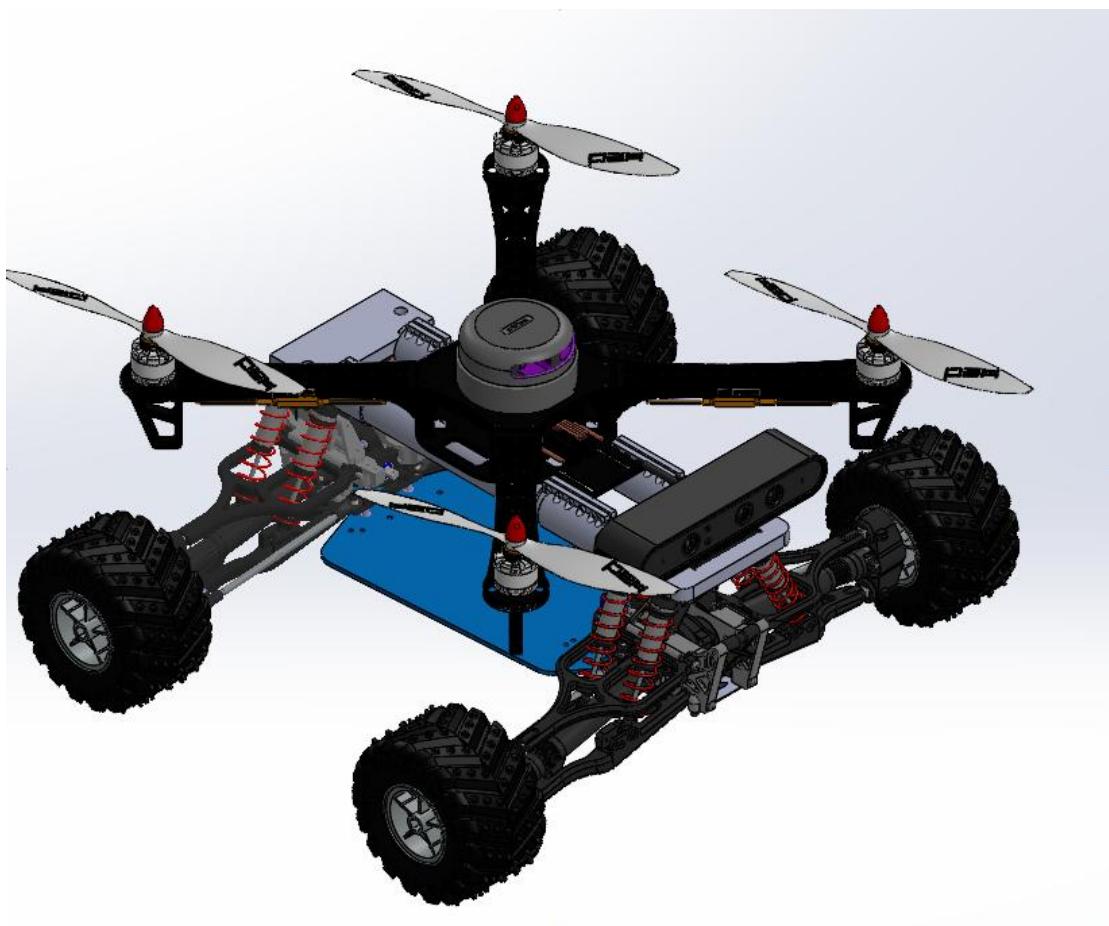
4、动力与续航模块 - 采用可充电电池供电，目前飞行续航能力 $\geq$ 25 分钟（满电状态下），未来计划通过固态电池与太阳能充电模块升级，提升续航性能。硬件系统的整体设计以“全地形适应+多模态感知+国产化自主决策”为核心，兼顾结构轻量化与功能集成度，为复杂灾害场景下的救援作业提供可靠的硬件支撑。



#### 2.2.2 机械设计介绍（如果有的话，从总体到局部，逐级给出各组件的具体设计）

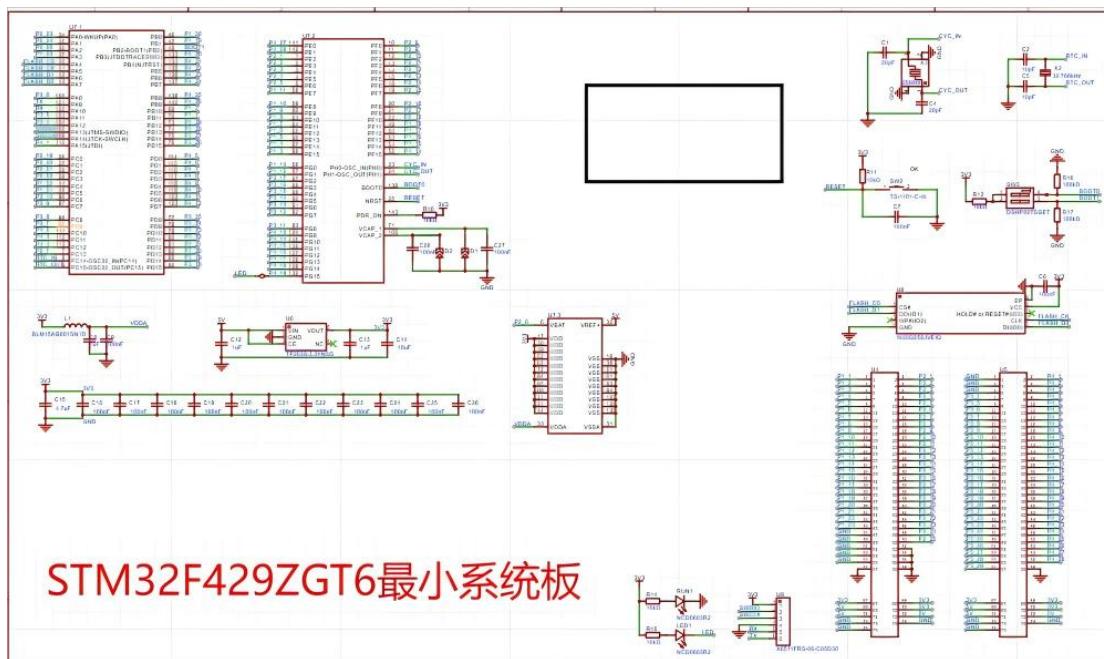
图) ;

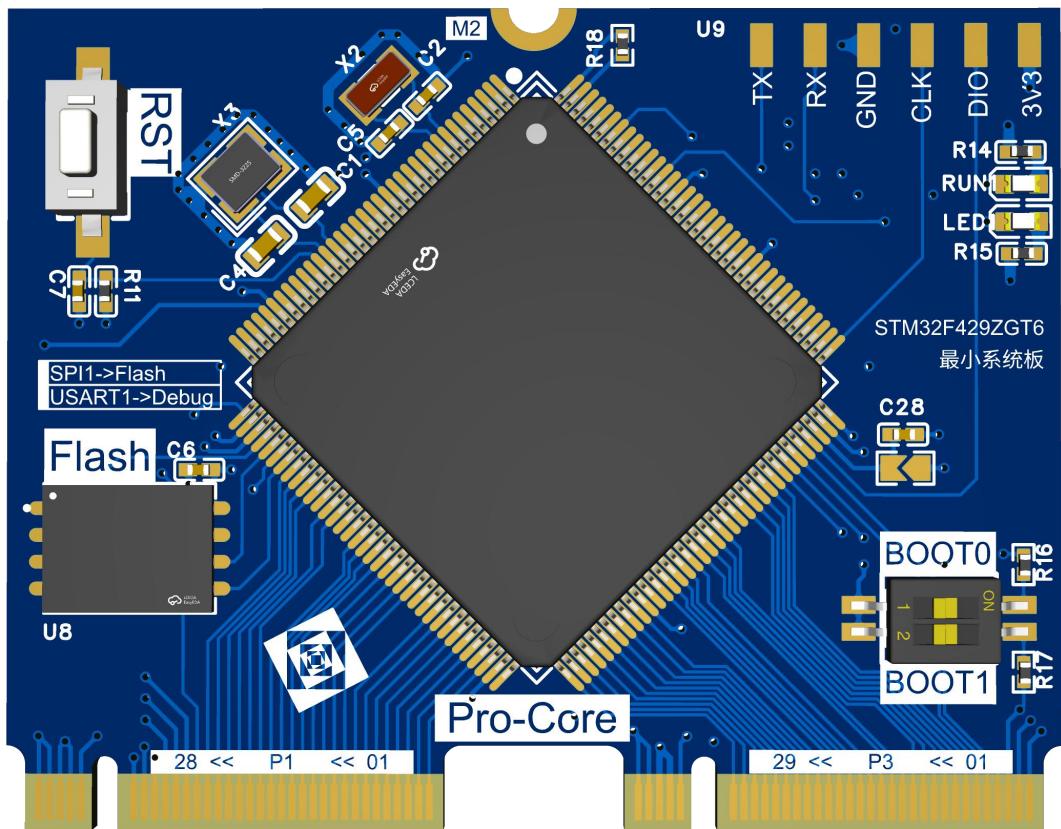
总体:

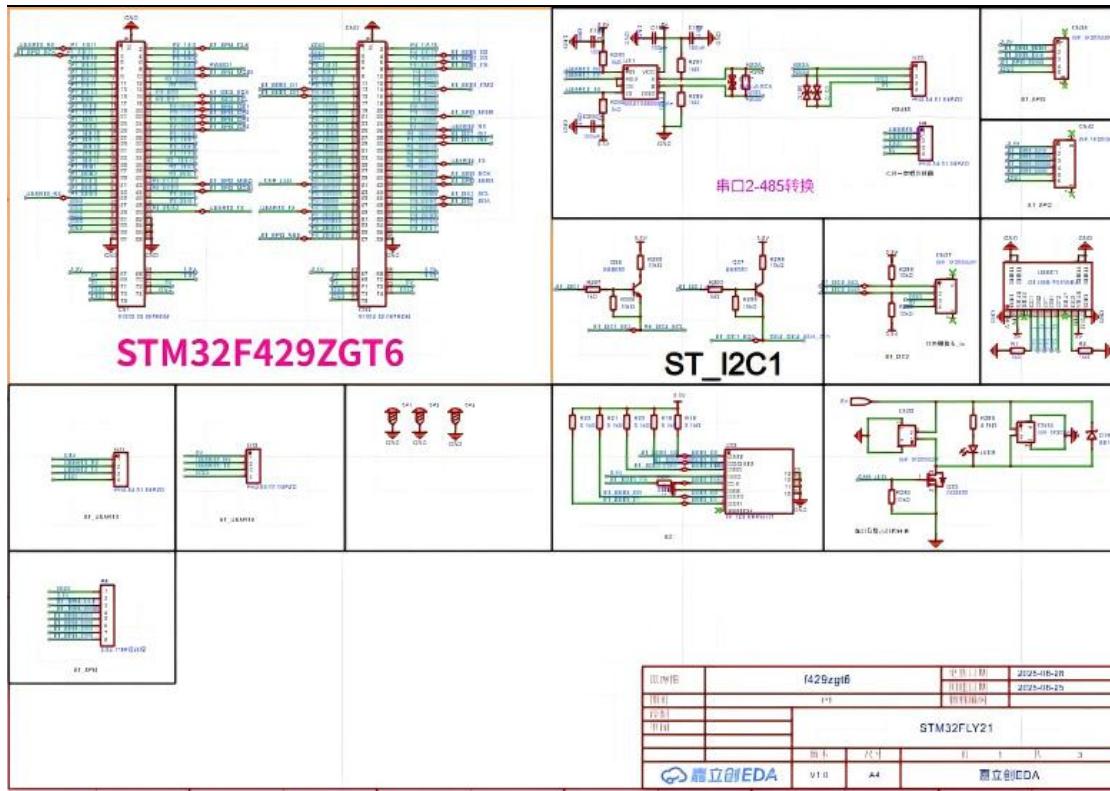




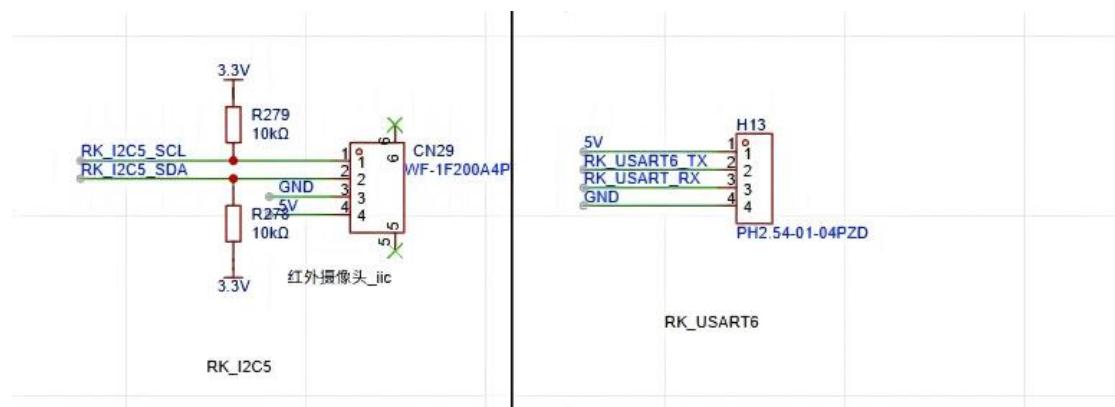
2.2.3 电路各模块介绍（从总体到局部，逐级给出各模块的具体设计图，并标记出关键的输入、输出信号线，可以是电路图、SCH 原理图、PCB 版图等截图）；



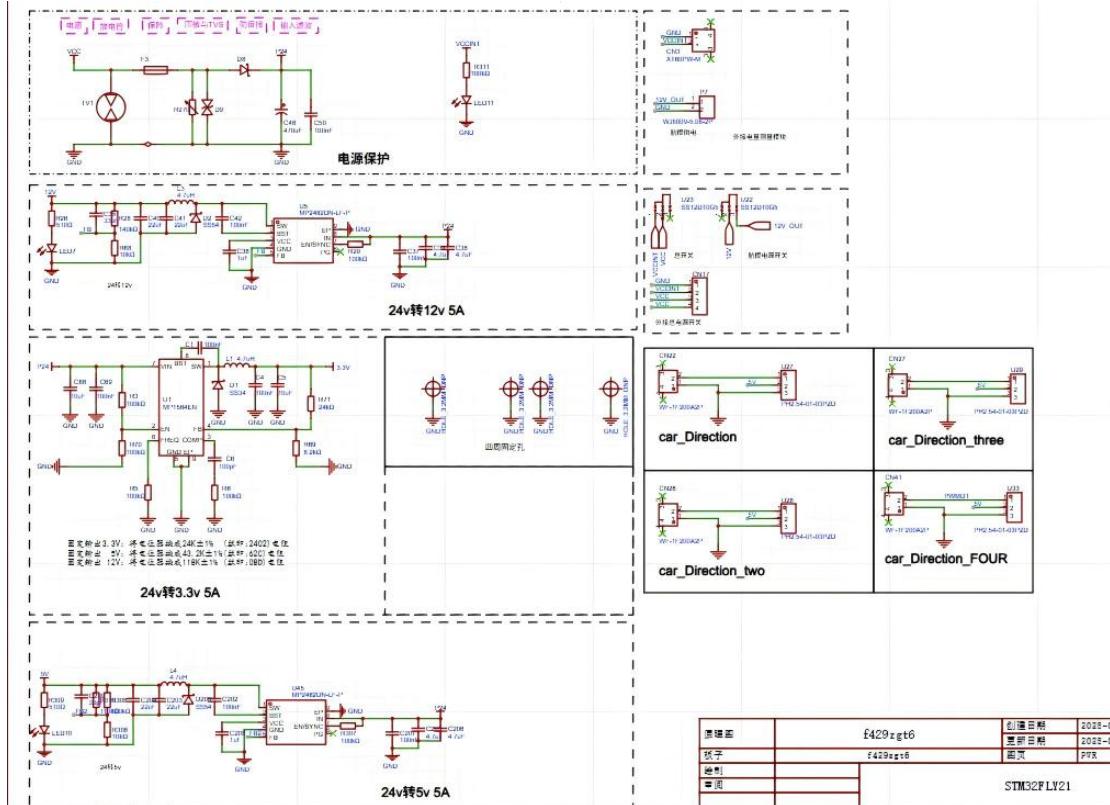


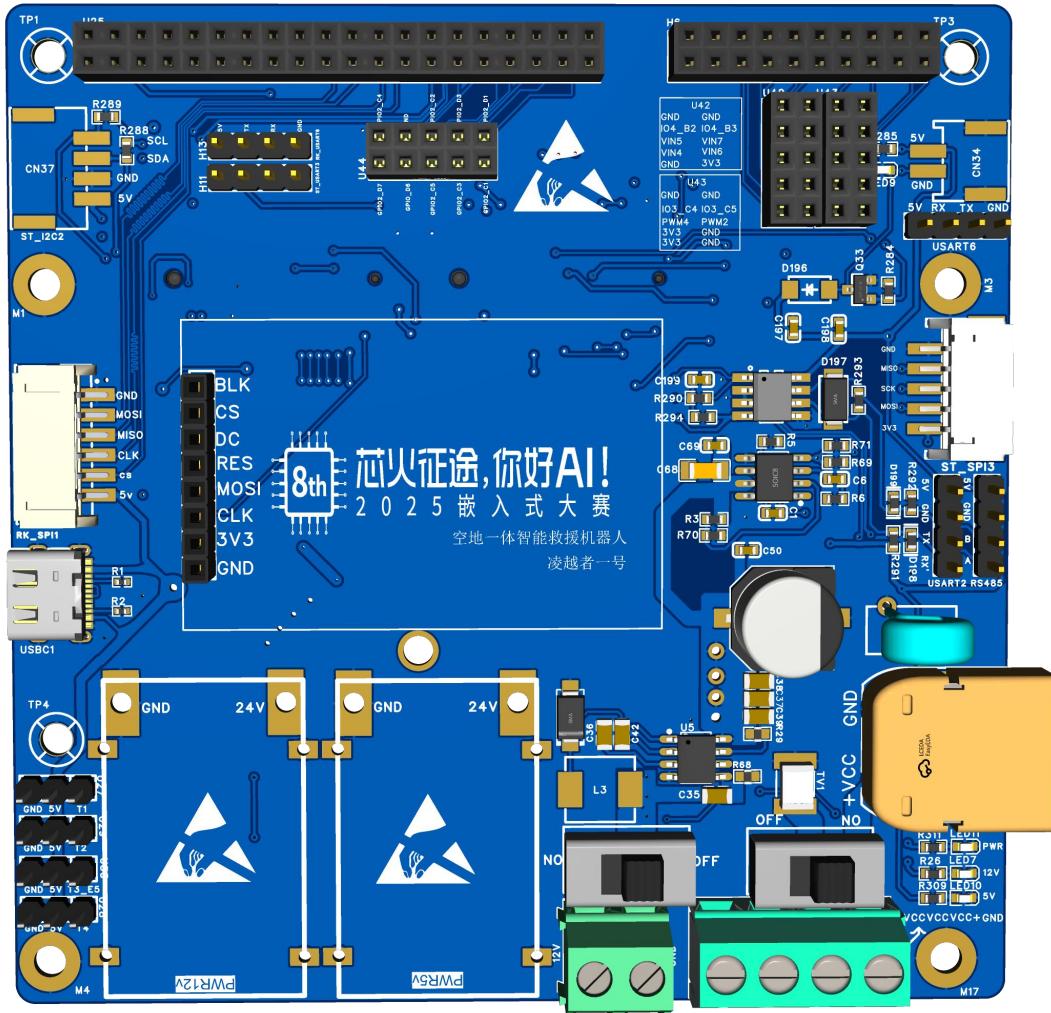


## RK3588 接入红外及串口引出



## 电源管理





## 2.3 软件系统介绍

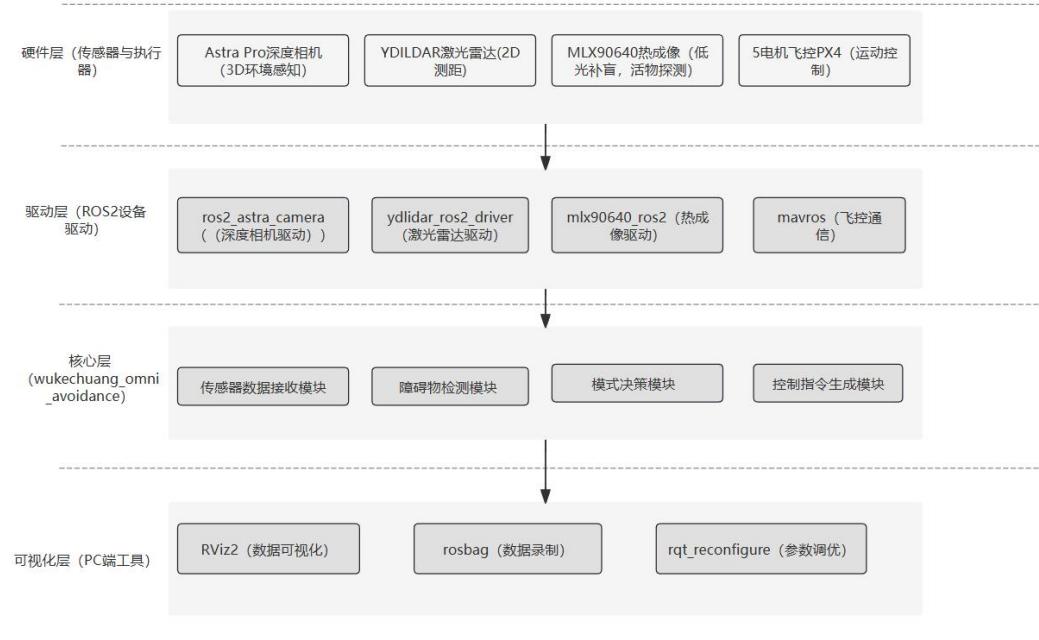
### 2.3.1 软件整体介绍（含 PC 端或云端，结合关键图片）；

#### 1. 系统定位与核心目标

本系统是一款基于 ROS2 (Humble) 开发的多模态避障软件，运行于 ELF2 开发板 (RK3588, Ubuntu 22.04)，适配地面 / 飞行双模机器人。核心目标是通过融合深度相机、激光雷达、热成像传感器数据，实现复杂环境下的自主避障——地面模式下绕行低矮障碍，高障碍场景自动切换至飞行模式跨越，低光环境通过热成像补盲，确保机器人运动安全性与连续性。

## 2. 系统架构（含硬件与软件分层）

系统采用“硬件层 - 驱动层 - 核心层 - 可视化层”四层架构，整体框图如下：



## 3. 关键特性与 PC 端工具

**多传感器融合:** 深度相机 (3D 环境) + 激光雷达 (2D 精确定位) + 热成像 (低光补盲)，提升障碍检测鲁棒性。

**双模切换:** 通过地面 / 飞行模式动态适配障碍类型 ( $\leq 0.3m$  障碍绕行,  $> 0.3m$  且无通道则飞行跨越)。

PC 端支撑工具：

**RViz2:** 实时可视化点云、激光扫描数据、障碍物标记及机器人轨迹（关键图片可展示 RViz2 界面，包含点云渲染和障碍标注）。

**rqt\_reconfigure:** 动态调整参数（如安全距离、飞行高度），无需重启节点。

**rosbag:** 录制传感器数据与控制指令，用于离线分析和算法优化。

---

软件各模块介绍（根据总体框图，给出各模块的具体设计说明。从顶层到底层逐次给出各函数的流程图及其关键输入、输出变量）；

## 模块 1：传感器数据接收模块

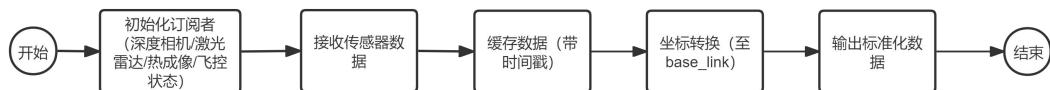
### 功能

订阅并标准化各传感器数据（统一坐标系与时间戳），为后续处理提供一致输入。

### 设计说明

通过 ROS2 的 Subscription 机制订阅传感器话题，使用互斥锁（mutex）保证多线程数据安全。依赖 tf2\_ros 将所有数据转换至机器人基坐标系（base\_link），消除传感器安装位姿误差。

### 流程图



---

## 关键输入 / 输出

类型	变量 / 话题名	描述	来源 / 去向
输入话题	/camera/depth/color/points	深度相机点云 (320×240, 10Hz)	ros2_astra_camera
输入话题	/scan	激光雷达扫描数据 (360°, 10Hz)	ydlidar_ros2_driver
输入话题	/thermal_image	热成像伪彩色图像 (32×24, 8Hz)	mlx90640_ros2
输入话题	/mavros/state	飞控状态(解锁 / 模式 / 连接状态)	mavros
输出变量	depth_cloud_	转换后的深度点云 (sensor_msgs::msg::PointCloud2)	障碍物检测模块
输出变量	lidar_scan_	激光雷达数据 (sensor_msgs::msg::LaserScan)	障碍物检测模块

## 模块 2：障碍物检测模块

### 功能

从标准化数据中提取障碍物信息（距离、角度、高度），融合多传感器结果以提升可靠性。

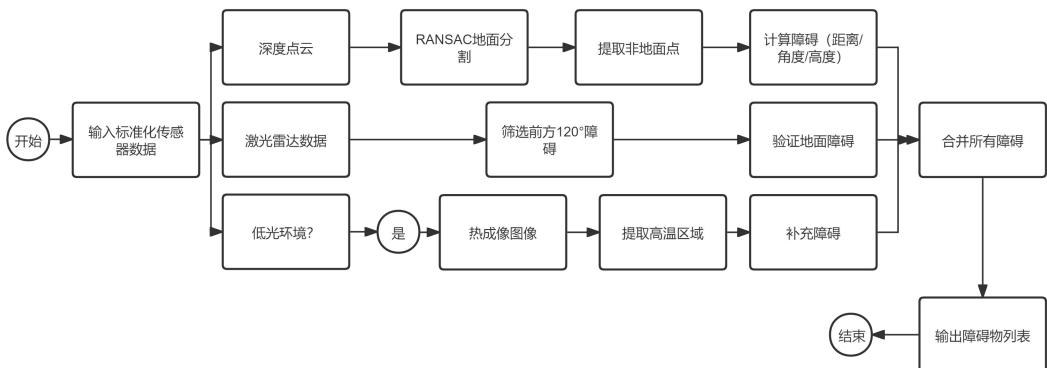
## 设计说明

**地面障碍物检测:** 用 RANSAC 算法分割深度点云中的地面，剩余点聚类为障碍物，计算高度与距离。

**激光雷达辅助:** 筛选前方  $120^\circ$  范围内障碍，验证地面检测结果（激光雷达测距精度更高）。

**热成像补盲:** 低光环境（彩色图像亮度 $<30$ ）时，提取热成像中高温区域（红黄色）作为障碍补充。

## 流程图



## 关键输入 / 输出

类型	变量名	描述	来源 / 去向
输入变量	depth_cloud_	转换后的深度点云	传感器数据接收模块
输入变量	lidar_scan_	激光雷达扫描数据	传感器数据接收模块
输入变量	thermal_img_	热成像图像 (cv::Mat)	传感器数据接收模块
输入参数	light_threshold	低光判断阈值 (默认 30)	config/params.yaml
输出变量	obstacles_	障碍物列表 (含 distance/angle/height)	模式决策模块

## 模块 3：模式决策模块

### 功能

基于障碍物列表判断机器人运动模式（地面 / 飞行），核心逻辑为“地面优先，无法通过则飞行”。

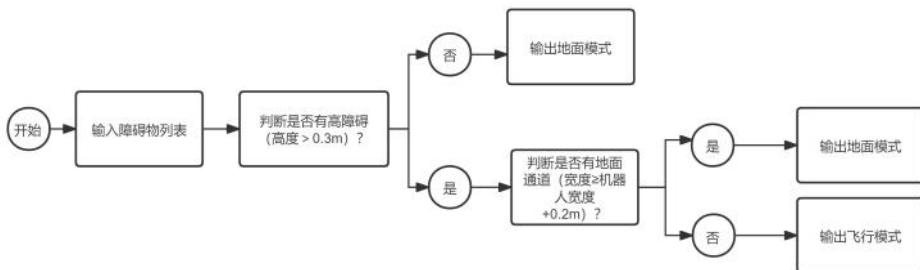
### 设计说明

**地面模式条件：**所有障碍高度 $\leq 0.3m$ （可配置），或存在宽度 $\geq$ 机器人宽度 + 0.2m 的地面通道。

**飞行模式条件：**存在高度 $> 0.3m$  的障碍，且无符合宽度要求的地面通道。

依赖 `has_ground_passage()` 函数计算障碍间隙宽度（基于激光雷达数据）。

### 流程图



### 关键输入 / 输出

类型	变量名 / 参数名	描述	来源 / 去向
输入变量	obstacles_	障碍物列表	障碍物检测模块
输入参数	ground_max_height	地面可通过最大高度（默认 0.3m）	config/params.yaml

类型	变量名 / 参数名	描述	来源 / 去向
输入参数	robot_width	机器人宽度（默认 0.4m）	config/params.yaml
输出变量	current_mode_	当前模式 (GROUND/FLIGHT)	控制指令生成模块

## 模块 4：控制指令生成模块

### 功能

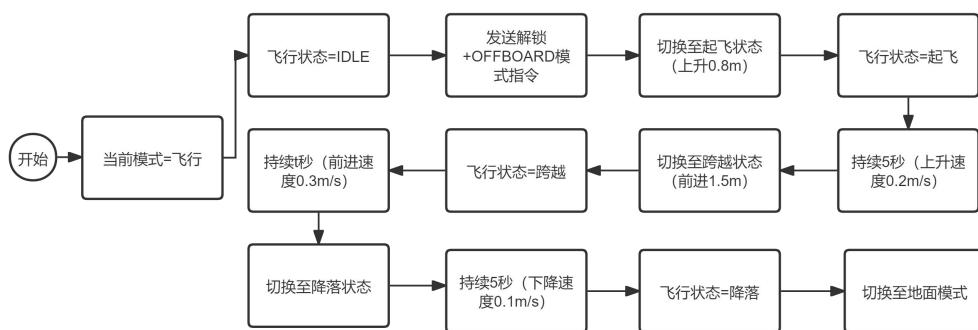
根据当前模式生成速度指令，通过 mavros 发送至飞控，控制机器人运动。

### 设计说明

**地面模式：**基于最近障碍的距离和角度生成线速度（前进 / 减速）和角速度（转向避开障碍）。

**飞行模式：**分阶段控制（起飞→跨越→降落），通过状态机管理各阶段速度（上升 / 前进 / 下降）。

### 流程图（飞行模式）



### 关键输入 / 输出

类型	变量名 / 参数名	描述	来源 / 去向
输入变量	current_mode_	当前模式	模式决策模块
输入变量	obstacles_	障碍物列表 (地面模式用)	障碍物检测模块
输入参数	flight.takeoff_height	起飞高度 (默认 0.8m)	config/params.yaml
输出话题	/mavros/setpoint_velocity/cmd_vel_unstamped	速度指令 (线速度 / 角速度)	飞控 (mavros)

### 三、关键函数与底层实现

各模块核心函数及调用关系如下：

**传感器数据接收:** depth\_callback()/lidar\_callback()（回调函数，实时更新缓存）。

**障碍物检测:** detect\_obstacles()（总入口）

→ detect\_ground\_obstacles()/detect\_thermal\_obstacles()（分传感器实现）。

**模式决策:** decide\_mode()（主逻辑）→ has\_ground\_passage()（通道判断）。

**控制指令:** control\_loop()（10Hz 循环）

→ generate\_ground\_command()/generate\_flight\_command()（分模式生成指令）。

### 第三部分 完成情况及性能参数

阐述最终实现的成果（图文结合，实物照片为主）

#### 3.1 整体介绍（整个系统实物的正面、斜45° 全局性照片）



共芯未来

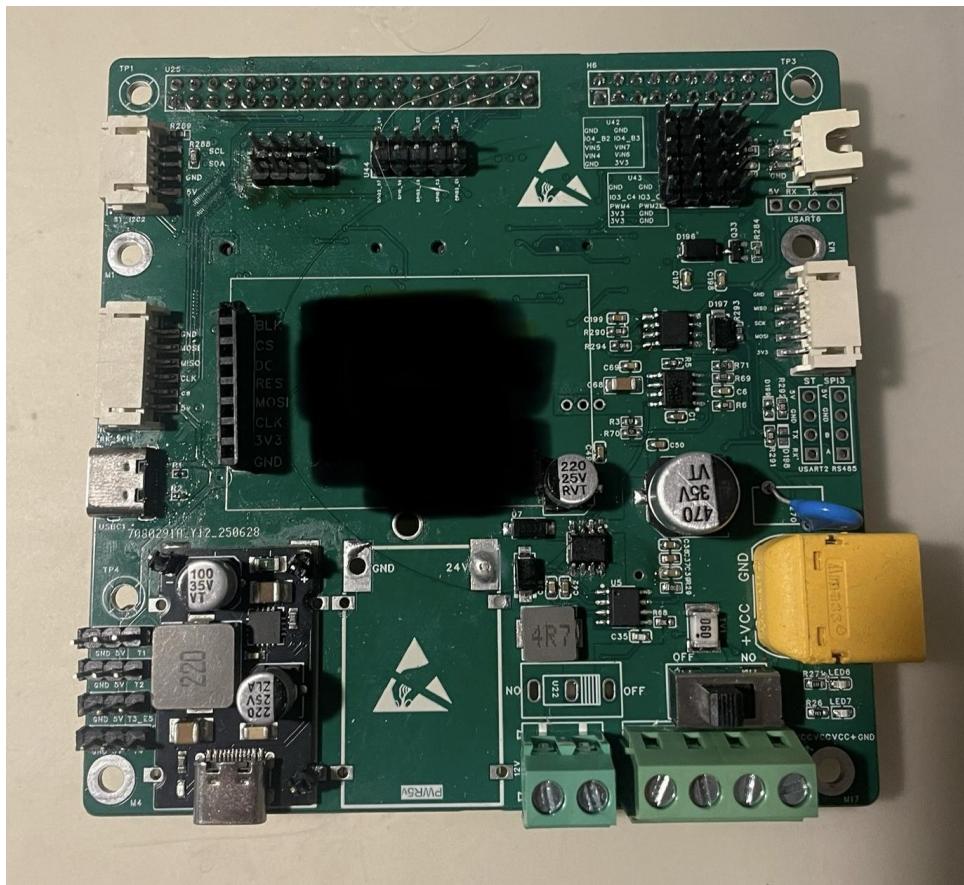


### 3.2 工程成果（分硬件实物、软件界面等设计结果）

#### 3.2.1 机械成果：（实物照片）

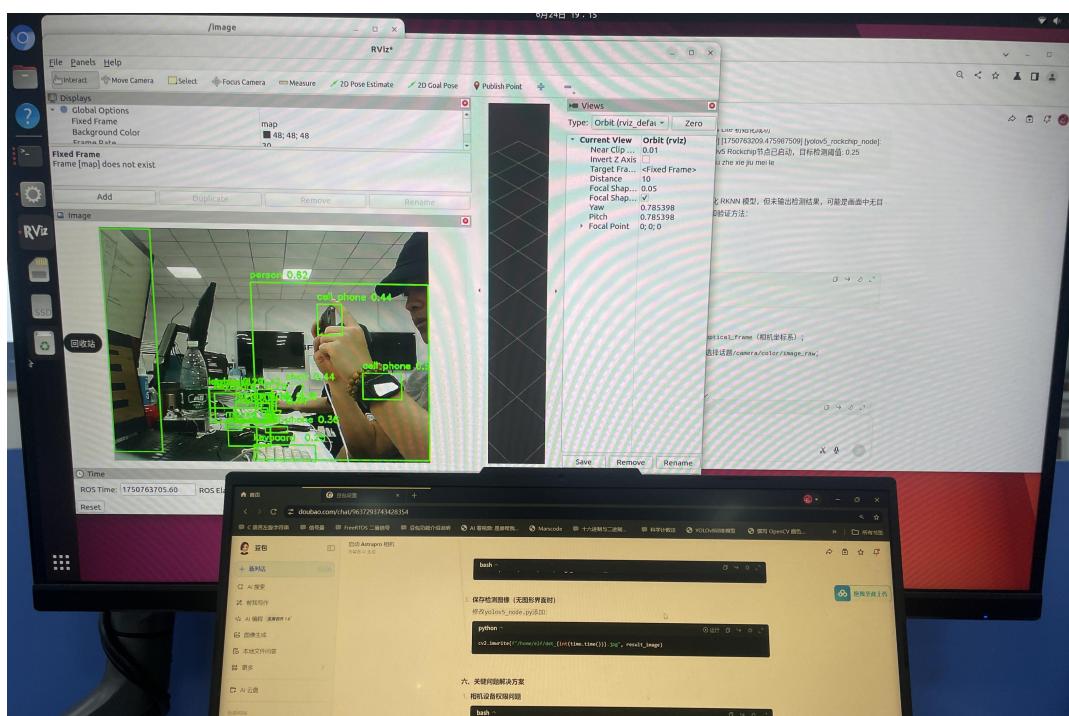
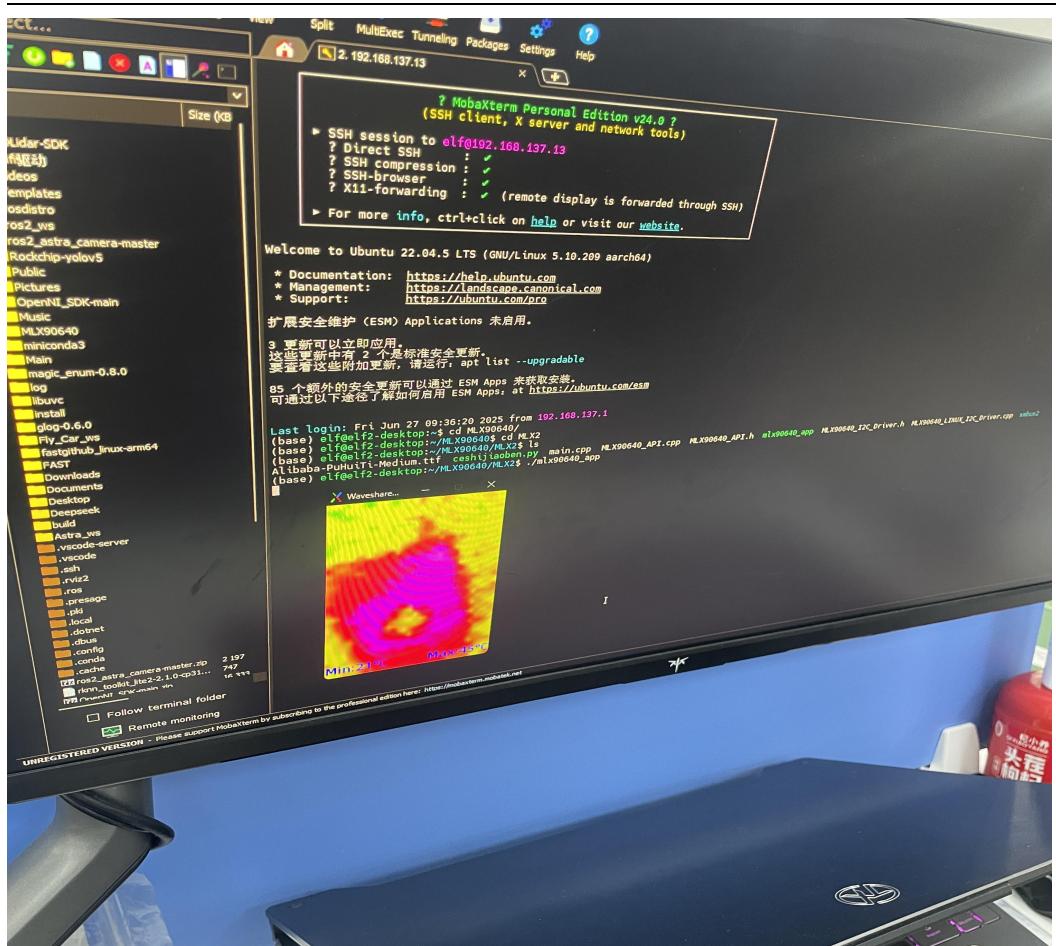


#### 3.2.2 电路成果：（实物照片）



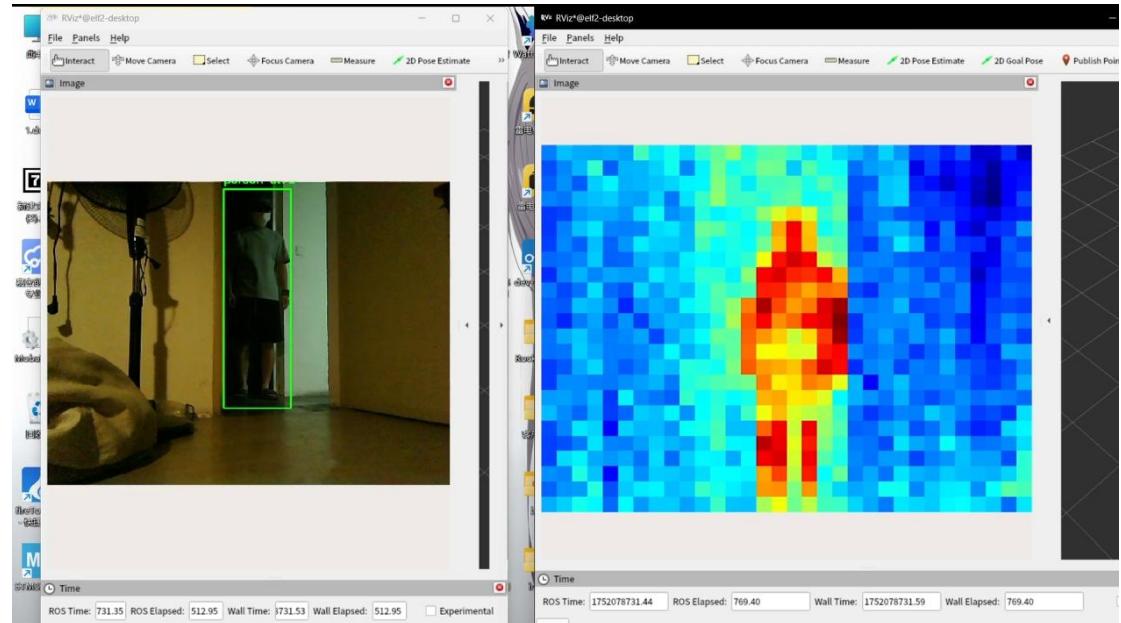
### 3.2.3 软件成果：（界面照片）

# 共芯未来



3.3 特性成果（逐个展示功能、性能参数等量化指标）（可加重要仪器测试或现场照片）；

低亮度场景热成像辅助识别（夜间生命探测准确率提升百分之 50）



低空巡航识别（识别准确率高达百分之 90）



## 第四部分 总结

### 4.1 可扩展之处

300 字内；

加入远程控制与云端协同，通过 4G/5G 实现远程监控与任务部署，结合边缘计算优化实时性，拓展至更广泛的智能作业领域。

升级硬件兼容性，支持可折叠机杆结构，提升复杂地形通过性，并兼容气体传感

器等多设备；

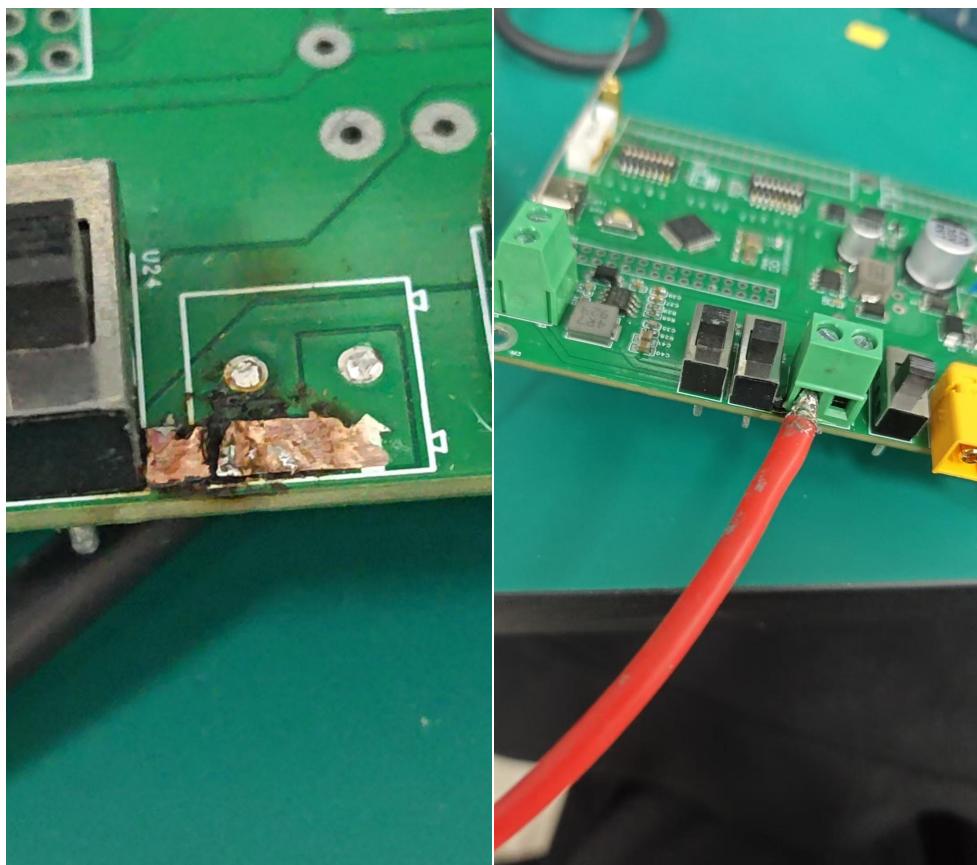
#### 4.2 心得体会

研发“凌越者”智能救援机器人的过程，是一场技术攻坚与团队协作的双重淬炼。作为一款融合智能越野、垂直起降飞行、智能决策于一体的高度集成化设备，其研发难度远超预期——既要实现地面与空中模式的无缝切换，又要在复杂环境中完成精准探测与自主决策，这对仅 3 人的本科技术团队提出了近乎苛刻的要求：每个人都必须兼具嵌入式开发的“硬功夫”与软件编程的“软实力”，更要保持持续学习的状态。我们全程在摸索中前行。既无学长经验可借鉴，也缺乏成熟方案参考，尤其在模块集成阶段，常陷入“两

眼一抹黑”的困境。

硬件电路设计时，两个典型问题曾让团队一度停滞：一是硬件资源匹配失衡。方案设计初期，受限于经验与成本，硬件配置仅满足理论需求，实践中却暴露出明显短板：**RK3588** 芯片算力负载过高，导致决策响应延迟；下位机单片机接口资源不足，不得不通过软件模拟硬件通信协议，既影响效率又增加故障风险。经过多轮讨论，我们新增树莓派 4 作为辅助上位机，分流主板算力并降低开发复杂度；同时将下位机升级为资源更丰富的 **STM32F429ZGT6**，从根本上解决接口瓶颈。二是

电源管理难题。项目初期的通电测试中，5个无刷电机启动时产生的200A往上的瞬时电流直接击穿了下位机电源板。紧急引入车载继电器后，通过延迟启动与电流缓冲，成功化解了这一危机。而在续航测试阶段，受限于场地与规定无法实机飞行，只能卸下机翼模拟运行，却发现各系统静默状态下的能耗异常惊人，直接导致续航缩水。团队连夜攻坚，新增智能电源管理模块，通过硬件分流与软件动态调节，最终优化了30%的能源浪费，显著提升了续航稳定性。



团队分工中，每个人都身兼数职：机械组为攻克45°斜坡越障，连续通宵调试悬架参数，在一次次结构变形与零件替换中找到最优配比；

算法组为确保复杂废墟场景路径规划成功率超 95%，曾连续 72 小时驻守实验室，反复迭代改进 A\*与 RRT 融合算法，直至代码在模拟环境中稳定运行。当原型机首次在模拟地震废墟中，精准定位到 15 米外的生命体征信号时，屏幕上跳动的坐标与清晰的热成像轮廓，让所有的疲惫瞬间烟消云散。那一刻我们深刻体会到：智能救援机器人的核心价值，从来不止于技术的堆砌，而是在极端环境中为生命争取“黄金时间”的能力。未来，我们将继续打磨每一个细节，让技术真正成为救援一线的坚实后盾。

## 第五部分 参考文献

按照标准格式，限 20 篇以内。