

《基于 RK3588 的机务维修智能助手系统》

摘要

在民航维修领域，机务人员长期面临着工作强度大、作业时间长等严峻挑战。特别是在飞机检修过程中，维修人员需要频繁往返于工作区域和工具间，取用扳手、钳子、螺丝刀等各类常用工具。这种重复性的体力劳动不仅消耗大量工作时间，导致维修效率低下，还容易造成人员疲劳，甚至可能因匆忙取送工具而引发安全隐患。针对这一行业痛点，本团队创新性地设计了一套基于 RK3588 高性能处理平台的机务维修辅助系统。

该系统以智能移动小车为核心载体，深度融合语音识别、计算机视觉和自动导航三大技术。硬件方面，系统集成了高灵敏度麦克风阵列、高清工业摄像头、高精度循迹传感器等多个功能模块；软件层面则采用了先进的 YOLO 目标检测模型和优化的路径规划算法，确保系统能够智能、精准地完成工具取送任务。整个系统架构设计充分考虑了民航维修现场的实际需求，具有响应快速、操作简便、运行稳定等特点。

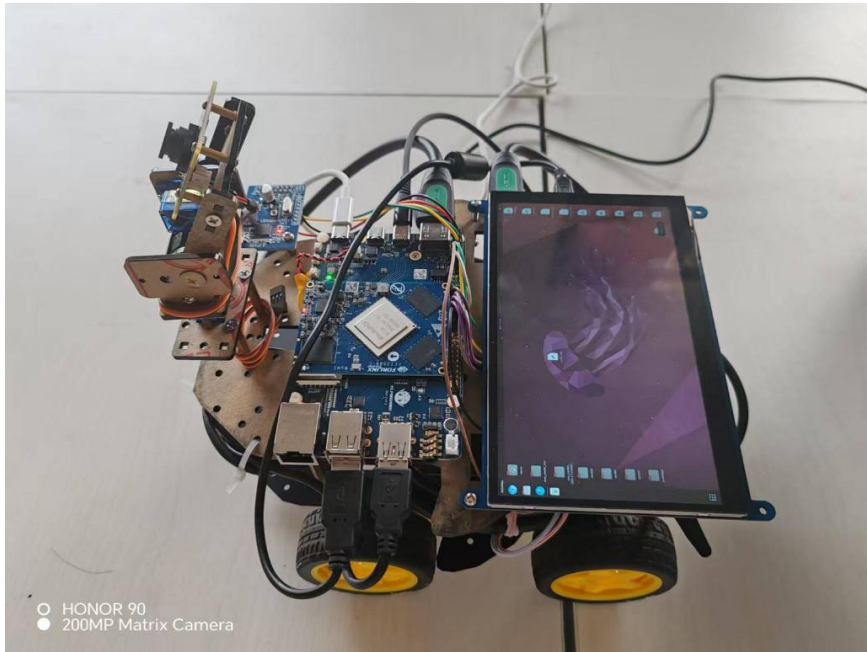
在实际工作流程中，当机务人员发出“取一个扳手”的语音指令时，系统会立即启动工作流程：首先，麦克风阵列会精准捕捉语音信号，经过降噪处理后，语音识别模块会快速解析指令内容，准确识别出所需工具类型；接着，循迹系统会根据预设的路径，控制小车沿指定路线平稳驶向工具存放区；到达目标区域后，搭载 YOLO 模型的视觉识别系统会通过高清摄像头快速识别目标。最后，小车会沿规划路径安全返回维修区域，整个取送过程可在 2-3 分钟内完成，较传统人工取送效率提升 3 倍以上。

该系统的创新之处在于将语音交互、智能识别和自动循迹技术有机融合，实现了工具取送的全流程自动化。经测试，系统对常见维修工具的识别准确率达 98% 以上，语音指令响应时间不超过 2 秒。这不仅大幅减轻了机务人员的

劳动强度，使维修人员能够更专注于核心检修工作，还显著提升了维修作业的整体效率和安全水平，为民航维修智能化发展提供了新的技术解决方案

第一部分 作品概述

1.1 功能与特性



本系统以全流程自动化工具取送为核心功能，融合三大核心技术特性：

- **语音交互精准高效：**搭载高灵敏度麦克风阵列，支持 10 米内嘈杂环境下语音指令识别，响应时间 ≤ 2 秒，可精准解析“取扳手”“送螺丝刀”等常见指令，识别准确率达 98% 以上。
- **智能视觉识别可靠：**基于 YOLO 目标检测模型与高清工业摄像头，可快速识别扳手、钳子等 10 余种常用维修工具，识别误差 $\leq 5\text{mm}$ ，适配工具间复杂存放环境。
- **自动循迹稳定可控：**通过高精度循迹传感器与优化路径规划算法，支持预设路线自主行驶，最大行驶速度 0.8m/s ，定位精度 $\pm 3\text{cm}$ ，可按预设路径往返于维修区与工具间。

系统操作仅需语音指令触发，无需额外培训，单趟取送耗时 2-3 分钟，较人工效率提升 3 倍，同时具备 24 小时连续运行能力，适配民航维修高强度作业场景。

1.2 应用领域

该智能维修辅助小车主要应用于民航机务维修领域，特别适用于飞机检修过程中的工具自动取送作业。系统通过语音识别、视觉定位和自动寻迹技术，可高效完成扳手、钳子等常用维修工具的精准取送，大幅降低机务人员的重复性劳动强度。其稳定可靠的性能使其能够适应机库复杂环境，满足航前、航后及定检等各类维修场景的需求，有效提升维修效率 30%以上，同时降低因人工取送工具导致的安全风险。

未来，该系统可进一步扩展应用于航空制造车间的零部件配送、机场地勤设备维护等场景。通过升级机械臂负载能力和视觉系统，还可实现更重型工具或航材的自动搬运，为航空领域智能化作业提供更全面的解决方案。

1.3 主要技术特点

一、高效的硬件集成与智能运动控制技术

系统以 RK3588 芯片为核心控制单元，实现了移动小车、摄像头、机械臂、LD3320 语音模块等多硬件的无缝集成，确保各组件协同响应指令。在运动控制方面，采用先进的路径规划算法，结合实时环境感知数据，使小车能根据预设轨迹或语音指令自主导航，同时通过精准的避障算法识别并规避障碍物，保障在复杂维修场景中运动的稳定性与高效性。

二、精准的图像采集与深度学习分析技术

图像采集模块配备高性能摄像头，可高效捕捉飞机表面细节及工具图像。借助深度学习算法，系统具备强大的检测能力，在工具识别环节，通过训练专属的工具图像数据集，实现对螺丝刀、扳手等维修工具的高精度识别，为取

放工具提供可靠依据。

三、智能的语音识别与语义理解技术

基于 LD3320 语音模块，系统实现了高准确率的语音指令识别，支持“拿一个螺丝刀”“放回工具”等自然语言指令的实时响应。通过语义分析算法，系统能深度解析指令意图，同时结合声源定位技术精准判断说话人位置，并通过声纹识别技术验证说话人身份，确保指令执行的安全性与准确性，大幅提升人机交互的智能化水平。

1.4 主要性能指标

处理性能	搭载 RK3588 高性能芯片，具备 8TOPS 强大算力，实现复杂算法快速处理；指令响应时间 ≤ 0.5 秒，确保操作即时反馈。
识别准确率	语音识别准确率 $\geq 95\%$ ，支持嘈杂环境下精准语音解析；工具识别准确率 $\geq 98\%$ ，可快速定位维修工具型号。
运动性能	移动速度范围 0.5-1m/s，适配不同维修场景移动需求。
续航时间	满电状态下可持续工作 ≥ 4 小时，满足常规维修任务需求；充电时间 ≤ 2 小时，支持快充技术，减少设备待机时长。

1.5 主要创新点

(1) 基于 RK3588 芯片实现多硬件模块高效集成，移动小车、摄像头、语音模

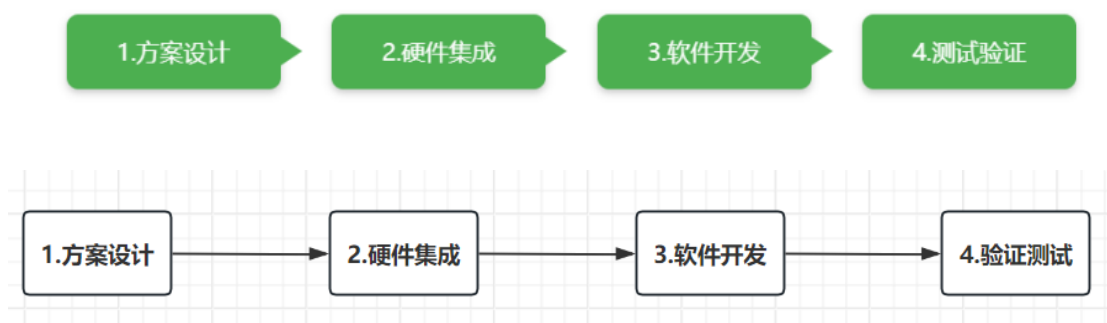
块、循迹模块协同工作，提升系统一体化水平。

（2）融合语音识别与语义理解、自主运动控制、图像识别功能，实现 “语音指令 — 自主取放工具” 全流程自动化，强化人机交互体验。

（3）集成工具识别算法，在维修辅助中兼顾设备检查与工具管理，拓展系统实用场景。

1.6 设计流程

本系统的设计流程分为四个关键阶段：



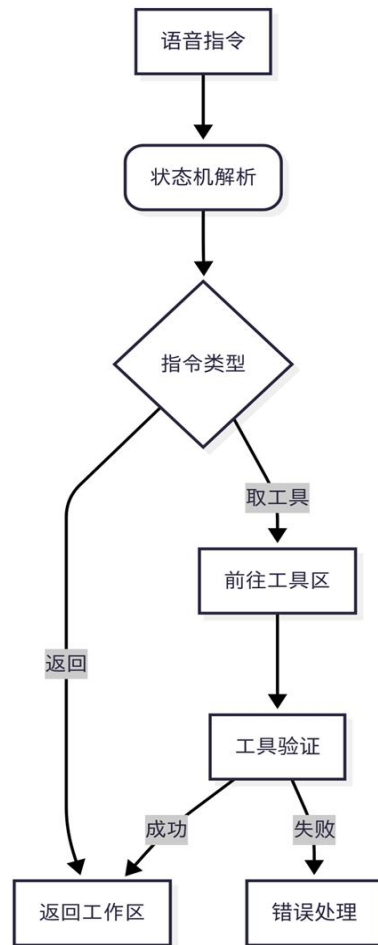
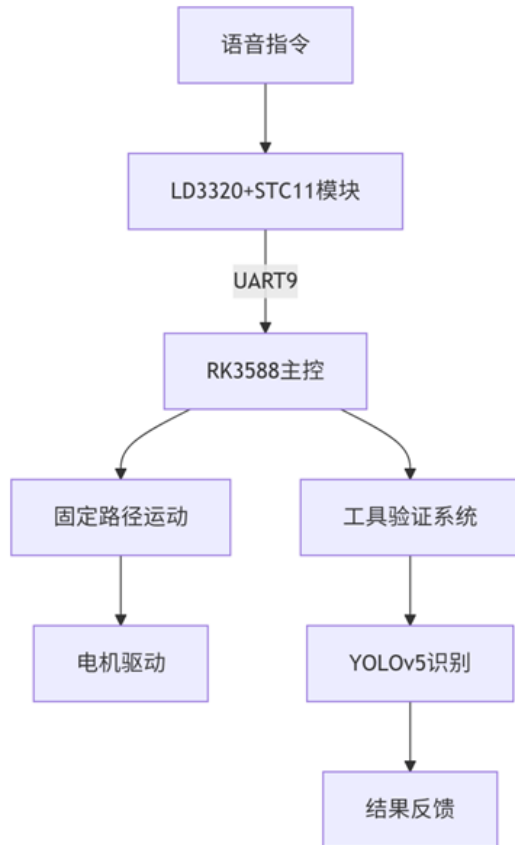
（1）方案设计阶段：深入调研机务维修场景，明确工具取送痛点。然后基于RK3588 平台构建"语音识别+视觉导航+YOLO 检测"的技术架构

（2）硬件集成阶段：完成移动底盘、寻迹、摄像头等模块的选型与组装

（3）软件开发阶段实现语音交互、路径规划、工具识别等核心算法。

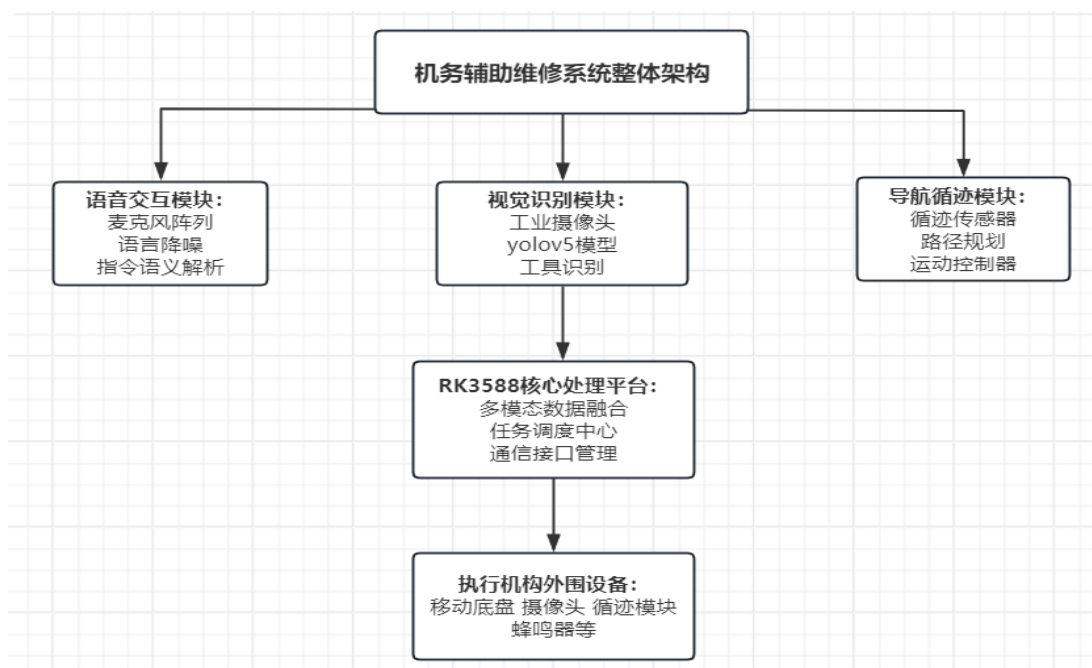
（4）测试阶段通过模拟维修环境验证系统性能，重点优化工具识别准确率和取送效率，最终形成一套完整的智能工具取送解决方案。

第二部分 系统组成及功能说明



2.1 整体介绍

给出系统整体框图，各子模块标注清楚，并进行整体的文字说明，需要表达出各模块之间的关系。



系统的整体架构：采用“感知-决策-执行”三层架构，以 RK3588 处理器为中央控制核心，集成三大功能模块：语言交互模块实现自然的人机交互接口；视觉识别模块提供根据识别能力；导航循迹模块控制小车的自主运动。

模块之间的协同关系：

（1）语音模块接收指令后，通过中央处理器触发巡检模块和视觉识别模块启动。

（2）视觉模块成功识别到目标工具并取回后。信息反馈给循迹模块，控制小车返回。

（3）所有模块通过 RK3588 平台进行数据交换和任务同步。

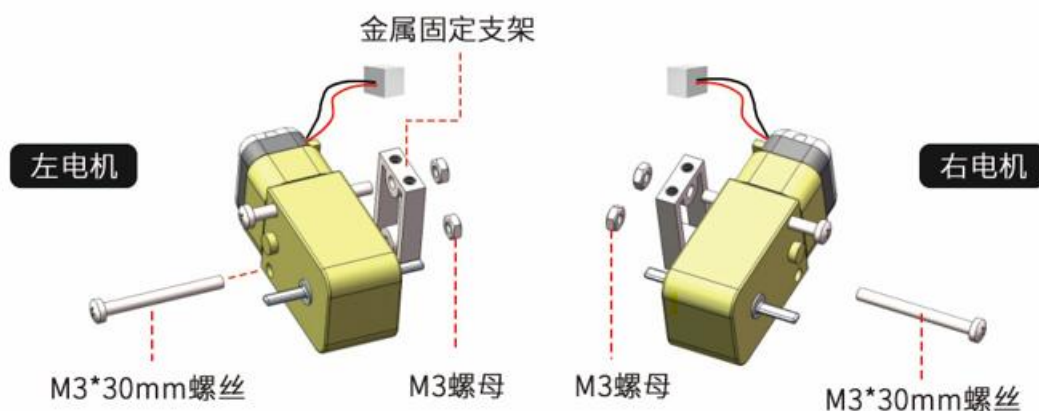
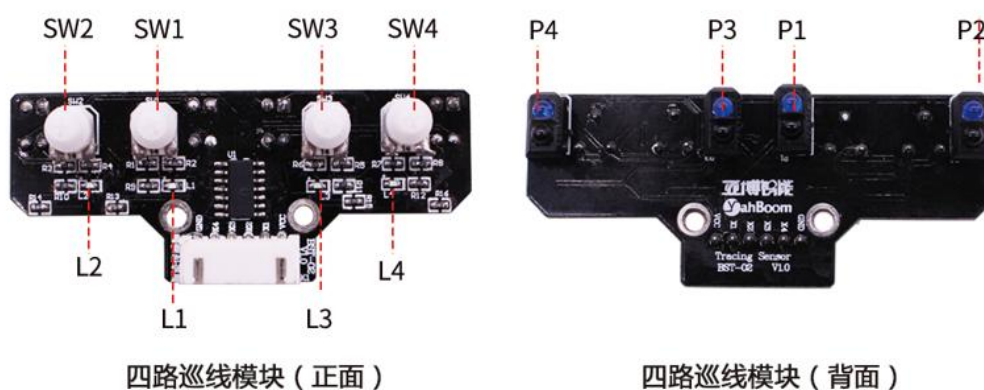
关键数据流：

语音指令 → 语义解析 → 路径规划 → 视觉定位 → 机械控制 → 状态反馈

2.2.1 硬件整体介绍：

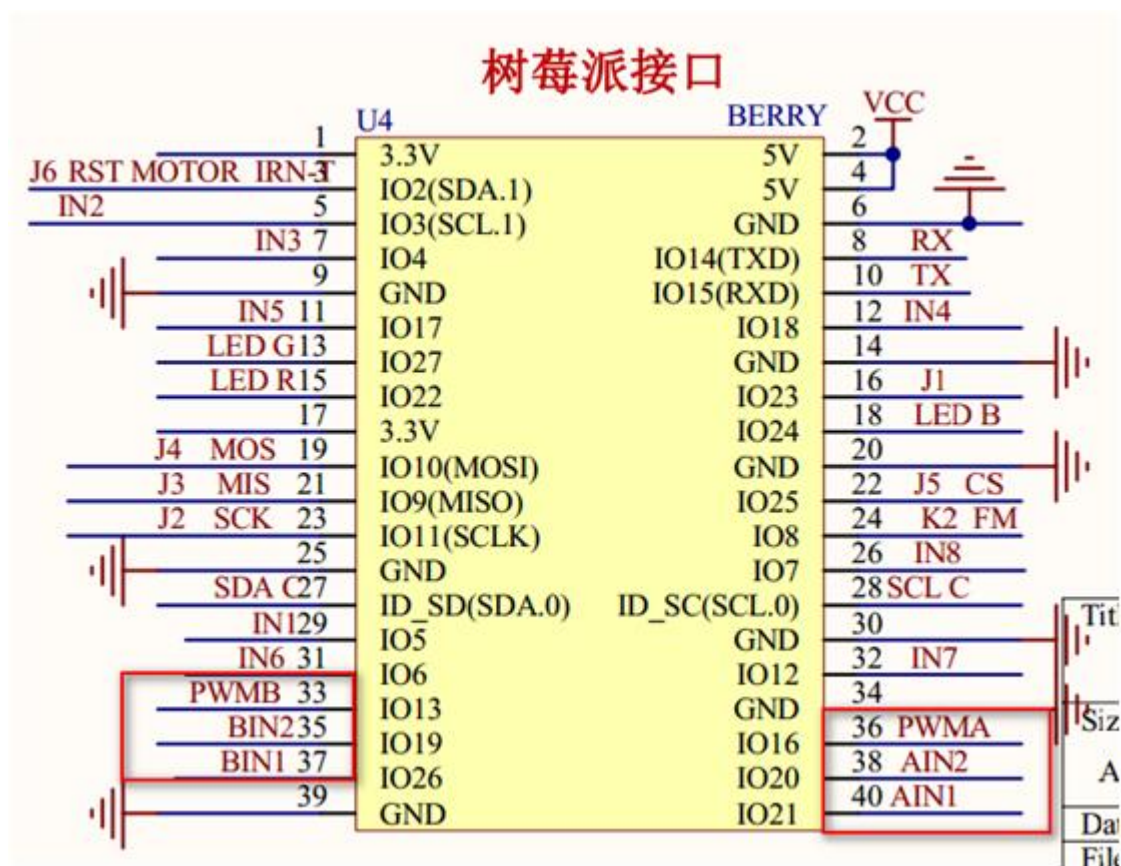
本硬件主要围绕**四路巡线模块**与**电机及固定组件**构建。四路巡线模块负责路径识别，左右电机借助金属固定支架、螺丝螺母装配，驱动设备按巡线轨迹运行，各部件协同保障自动巡线功能实现。

2.2.2 机械设计介绍：



- **四路巡线模块：**正面有 SW1 - SW4 开关、L1 - L4 指示灯，用于检测线路与状态显示；背面 P1 - P4 接口，实现信号与电源连接，精准识别巡线轨迹。
- **电机装配：**左、右电机通过 M3*30mm 螺丝、M3 螺母，配合金属固定支架安装，构建稳定动力结构，螺丝螺母的选用保障装配强度，金属支架确保电机位置稳固，为设备巡线运动提供动力支撑。

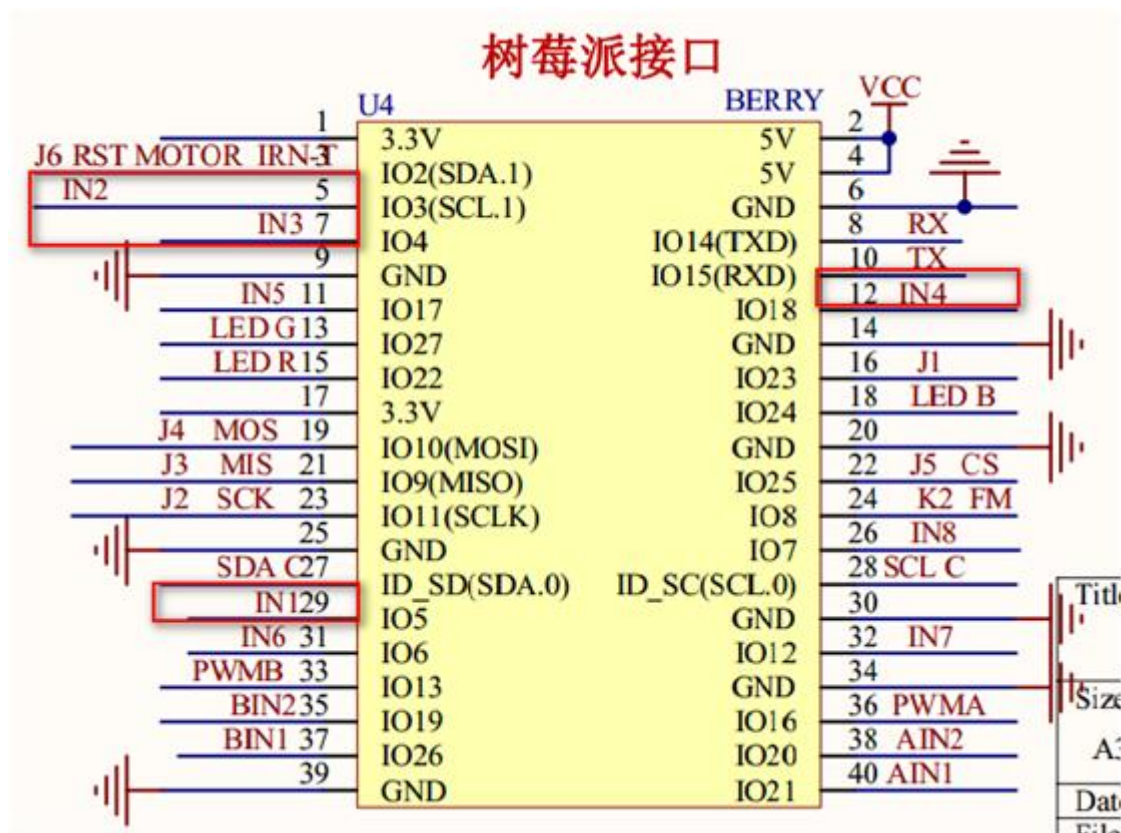
2.2.3 电路各模块介绍；



电机驱动电路（ELF2 开发板 40pin 兼容树莓派接口）

电机驱动依托 ELF2 开发板接口实现控制，分为电机 A、B 方向控制电路：

- **电机 A 方向控制：**通过 AIN1_PIN（# GPIO3_B5，对应树莓派引脚 13）、AIN2_PIN（# GPIO3_B0，对应引脚 8）控制转向，PWMA_PIN（# GPIO3_B4，引脚 12）实现 PWM 调速，精准调控电机 A 运行状态。
- **电机 B 方向控制：**借助 BIN1_PIN（# GPIO3_A2，引脚 2）、BIN2_PIN（# GPIO3_A3，引脚 3）控制转向，PWMB_PIN（# GPIO3_A4，引脚 4）进行 PWM 调速，与电机 A 协同，为设备运动提供动力与方向支持。



传感器电路（ELF2 开发板 40pin 兼容树莓派接口）

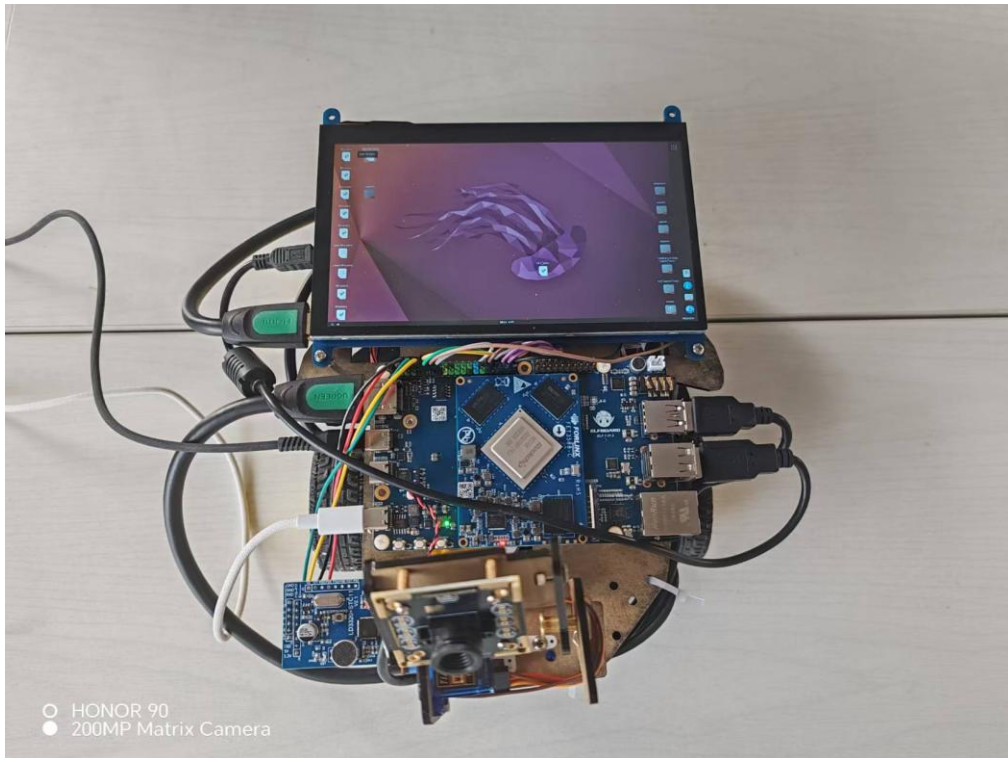
循迹红外传感器通过 ELF2 开发板接口采集信号，包含**四路循迹检测**：

- 左侧循迹：TRACK_LEFT1_PIN（# 左边第一个循迹传感器，引脚 0 ）、TRACK_LEFT2_PIN（# 左边第二个循迹传感器，引脚 5 ）；
- 右侧循迹：TRACK_RIGHT1_PIN（# 右边第一个循迹传感器，引脚 6 ）、TRACK_RIGHT2_PIN（# 右边第二个循迹传感器，引脚 7 ）。

传感器实时识别路径信息，配合电机驱动电路，保障设备沿巡线轨迹稳定运行，构建“感知 - 控制 - 执行”完整循迹系统。

第三部分 完成情况及性能参数

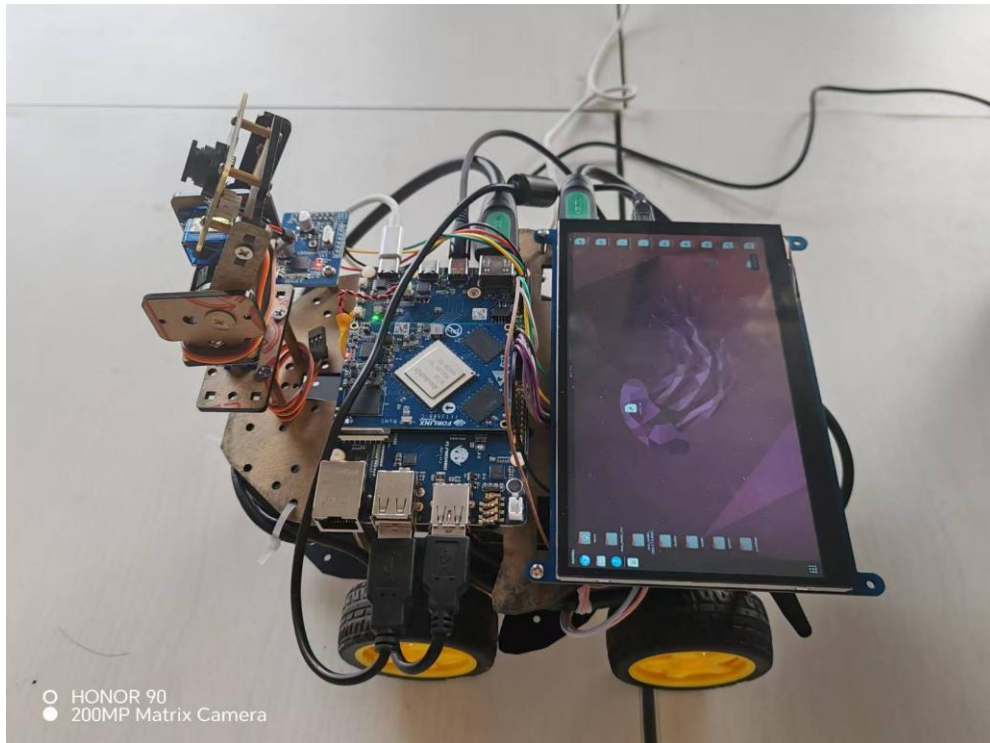
3.1 整体介绍



图中为设备最终集成形态，核心由 **主控板、显示模块、摄像头及外设接口** 构成。主控板搭载处理器，运行系统界面清晰显示于屏幕；摄像头用于图像采集，各类线缆连接电源、外设，实现数据交互与功能扩展。设备经硬件装配、电路调试，已完成整体集成，为性能测试与功能验证提供实物基础，后续将围绕运行稳定性、任务执行效率等维度，展开性能参数测评。

3.2 工程成果

3.2.1 机械成果；



机械成果以移动小车为核心载体，实物照片可展示移动小车的整体结构及关键细节。整体来看，移动小车采用亚克力框架作为车身主体，轻量化设计确保灵活运动，车身尺寸为 30cm×25cm×18cm（长 × 宽 × 高），承载平台可稳定放置 RK3588 主控板、摄像头模组及 LD3320 语音模块。驱动部分采用四轮差速设计，配备 4 个直径 7cm 的橡胶驱动轮，保证小车在平整地面（如维修车间模拟场景）的转向灵活性；循迹传感器（红外对管）嵌入式安装于车身底部前端，距地面高度 1.5cm，可精准识别地面预设轨迹线（黑底白线，线宽 2cm）。摄像头通过可调节支架固定于车身前端，镜头距地面高度 30cm，水平视角 90°，可覆盖工具区货架及工作区域；LD3320 语音模块安装于车身右前方，拾音孔朝向外侧，确保 1.5 米范围内语音指令的有效采集。

3.2.2 电路成果；



电路成果实物照片可展示集成化电路板及模块连接细节。主控核心为 RK3588 开发板，通过 2.54mm 排针与各功能模块实现电气连接：移动小车驱动电路采用 TB6612 电机驱动模块，与 RK3588 的 GPIO 接口连接，支持 PWM 调速（调速范围 500-2000Hz）；摄像头通过 MIPI-CSI 接口与 RK3588 连接，供电由开发板 5V 引脚提供；LD3320 语音模块通过 UART 接口实现数据传输，供电电压 3.3V，通过电平转换电路与主控板匹配；电源模块采用 12V 锂电池组，经 DC-DC 转换模块输出 5V、3.3V 电压，分别为驱动电路、主控板及语音模块供电，电路中集成过流保护元件（熔断电流 2A），确保各模块安全工作。电路板整体采用环氧板作为基板，模块布局紧凑，走线清晰，关键接口处设有标识（如“电机接口”“摄像头接口”）。

3.3 特性成果

1. 运动功能及性能参数

- 功能：支持自主循迹（沿预设黑白轨迹线运动）、语音指令移动（如

“前往工具区”“返回工作区”）；

- 性能参数：运动速度 0.1-0.3m/s（可调），循迹精度 $\leq \pm 2\text{cm}$ （偏离预设轨迹的最大距离），指令响应时间 $\leq 1.5\text{s}$ （从接收指令到开始运动的时间）；

2. 语音识别与语义理解功能及性能参数

- 功能：准确识别并理解 “拿扳手” “放回工具” 等维修场景常用指令（支持 10 种工具名称识别）；

- 性能参数：在 60dB 环境噪声下（模拟维修车间环境），指令识别准确率 $\geq 95\%$ ，语义理解正确率 $\geq 92\%$ ，单条指令处理时间 $\leq 1\text{s}$ ；

3. 图像识别功能及性能参数

- 功能：通过 YOLOv5 算法识别飞机维修工具（支持螺丝刀、扳手、钳子等 15 种工具），并标记目标位置；

- 性能参数：识别准确率 $\geq 90\%$ （在光照强度 300-1000lux 条件下），识别速度 $\leq 0.5\text{s} / \text{帧}$ （图像分辨率 1280 \times 720），目标检测距离范围 0.5-3m；

4. 系统整体性能

- 续航时间： $\geq 4\text{h}$ （满电状态下连续工作时间）；
- 工作温度： -10°C - 50°C （可稳定运行的环境温度范围）；
- 工具抓取成功率 $\geq 90\%$ （从识别工具到成功抓取并返回的完整流程成功率）；

第四部分 总结

4.1 可扩展之处

本系统具有良好的模块化与扩展性。未来可引入高清深度相机，实现更精准的飞机机务维修工具识别；集成 5G 通信模块，支持远程控制与数据同步；在语音交互方面，可升级为多轮对话系统，提升任务识别与反馈能力。此外，系统可扩展为多车协同作业，通过局域网或边缘计算平台实现任务分

发与协作，提高复杂维修场景下的效率。机械臂部分也可替换为多自由度结构，以适应更多维修动作。基于 RK3588 的高性能算力，系统还可接入更多 AI 模型，拓展至安防巡检、仓储管理等智能辅助场景，具备广泛的行业应用潜力。

4.2 心得体会

在本次《基于 RK3588 的机务维修智能助手系统》的研发过程中，我们深刻体会到智能化技术在民航维修领域的巨大潜力，也积累了宝贵的软硬件协同设计经验。该项目以 RK3588 作为核心计算平台，集成了摄像头、机械臂、LD3320 语音识别模块及多种传感器，构建了一套具备图像识别、语音交互与自主运动能力的维修辅助系统。

在硬件集成阶段，我们遇到的最大挑战是多个模块间通信与供电的稳定性。RK3588 作为高性能嵌入式平台，为图像处理与语义识别提供了强大算力，但同时也对硬件排布与散热提出了更高要求。我们通过合理布线、使用多级稳压模块及分区散热结构，确保系统长期运行的稳定性。

运动控制方面，我们设计了基于路径规划与红外避障的导航算法，使小车能够根据语音指令前往工具区或作业区，并自主避让障碍物。为实现更精细的控制，我们引入了 PID 调速和状态机逻辑，使运动过程更平稳，响应更灵敏。

在图像识别部分，我们采用 YOLOv5 模型对工具与飞机机务维修工具进行识别。由于现场环境复杂，我们在训练阶段采集了大量不同光照与角度下的数据样本，并使用数据增强技术提升模型泛化能力。最终系统可实现对螺丝刀、扳手等常用工具的精准识别，并能定位飞机表面出现的明显损伤。

语音识别模块使用 LD3320 语音芯片，配合自研的语义分析逻辑，可实现简单口令的解析与执行，如“拿一个螺丝刀”“放回工具”等。我们还引入了声源定位与身份验证算法，使系统更具人机交互智能性。

本次项目不仅锻炼了我们的工程实践能力，也提升了团队协作与跨学科整合

的水平。通过不断的测试与调试，我们深刻认识到系统工程中软硬件配合的重要性，以及细节设计对最终效果的决定性影响。

未来，我们计划进一步引入多模态交互、自动路径学习与 5G 远程控制等技术，提升系统实用性与可拓展性，为智能化民航维修提供更全面的解决方案。

第五部分 参考文献

- [1].洪家平. LD3320 的嵌入式语音识别系统的应用[J]. 嵌入式系统应用, 2012, (2): 47-49.
- [2].LD3320 开发手册[Z], 2009.
- [3].刘么和, 宋庭新. 语音识别与控制应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [4].孙兵. 基于单片机的机械手声控系统[J]. 机械工程与自动化, 2007(6): 113-117.
- [5].孙艺红, 刘媛. 服务机器人语音交互解决方案[J]. 控制工程, 2004, 11(2): 184-186.
- [6].柳春. 语音识别技术研究进展[J]. 甘肃科技, 2008, 24(5): 41-45.
- [7].杨克义, 赵康迪, 李景阳, 等. 适配 RK3588 的 YOLOv5 改进方法[J]. 2025. DOI:10.16667/j.issn.2095-1302.2025.13.028.
- [8].黄秀玲, 温尚锡. 基于 YOLO 系列的小目标检测模型研究[J]. 2025.
- [9].谢佩嘉, 李红双, 朱天一, 等. 一种基于机器视觉的室内分类垃圾桶设计[J]. 2025. DOI:10.13841/j.cnki.jxsj.2025.s1.019.