

四轴无人机与地面设备交互连接控制系统的设计与实现

田晶, 姚贵发, 李神生, 罗晋权
广东岭南职业技术学院, 广东 清远 511500
DOI: 10.61369/SSSD.2026030004

摘 要 : 随着无人机技术的迅猛发展, 其在工业巡检、精准农业、地理测绘、应急救援及影视航拍等领域的应用持续深化。四轴无人机作为多旋翼飞行器的典型代表, 凭借机械结构简洁、操控灵活、可垂直起降及悬停等优势, 成为民用与科研领域的主力平台。无人机系统的效能与智能化水平, 根本上依赖空-地间稳定、高效、低延迟、高带宽的双向交互连接。当前商用解决方案存在协议封闭、定制性弱、成本高昂或扩展性不足等问题, 难以满足特定科研与高端行业需求。本文设计实现的系统, 构建了开放、可靠、可扩展的软硬件开发测试平台, 在通信链路管理、系统集成度和任务智能化支持方面具有重要参考价值。

关 键 词 : 四轴无人机; 地面控制站; 交互连接; MAVLink; ROS; 冗余通信; 系统集成

Design and Implementation of the Control System for the Interaction between the Quadrotor and the Ground Equipment

Tian Jing, Yao Guifa, Li Shensheng, Luo Jinqun
Guangdong Lingnan Institute of Technology, Qingyuan, Guangdong 511500

Abstract : With the rapid advancement of drone technology, its applications in industrial inspection, precision agriculture, geographic surveying, emergency rescue, and aerial videography have been continuously expanding. As a quintessential example of multi-rotor aircraft, quadcopters have emerged as the primary platform in both civilian and research fields, thanks to their streamlined mechanical structure, flexible operation, vertical takeoff/landing capability, and hovering capacity. The efficiency and intelligence of drone systems fundamentally depend on stable, efficient, low-latency, high-bandwidth bidirectional communication between air and ground. Current commercial solutions, however, face challenges such as protocol isolation, limited customization, high costs, and scalability issues, making them inadequate for specialized research and high-end industrial demands. This paper presents an open, reliable, and scalable software/hardware development and testing platform, which holds significant reference value in communication link management, system integration, and intelligent mission support.

Keywords : quadcopter; ground control station; interactive connection; MAVLink; ROS; redundant communication; system integration

一、绪论

(一) 研究背景与意义

无人机(UAV)技术是航空航天领域的热门发展方向, 四轴多旋翼无人机在航拍、植保、巡检等多领域广泛应用。完整无人机系统包含飞行平台、飞控系统模块, 地面站作为系统“中枢”, 是人机交互、任务规划与数据处理的核心, 其交互连接性能直接决定无人机整体能力。理想的交互连接系统需具备高可靠、低延迟等特性, 而当前多数无人机交互系统采用封闭协议, 难以满足科研与定制需求。因此, 基于开源生态研发高性能、可扩展的四轴无人机交互连接控制系统, 兼具理论与实践价值, 能

推动技术创新与行业应用^[1]。

(二) 国内外研究现状

国外无人机交互连接系统开源生态成熟, PX4、ArduPilot等主流开源飞控项目依托 MAVLink 通信协议构建核心架构, 配套 QGroundControl 等开源地面站软件, 结合 ROS 中间件与 MAVROS 包, 可便捷集成计算机视觉、SLAM 等高级算法。国内无人机技术发展迅猛, 相关研究与应用在跟进国际开源项目的同时, 推出多领域定制化方案, 聚焦通信协议优化、国产化替代等方向, 但在构建全栈式、高可靠性的开源交互连接系统上仍存探索空间, 强干扰、超视距场景下的智能冗余通信与故障恢复机制, 仍是当前研究热点与难点^[2]。

基金项目: 广东省普通高校特色创新项目(自然科学)——乡村振兴背景下“山区丘陵地带无人耕种机”研制(2024KTSCX365)。

（三）本文主要研究内容与创新点

1. 主要研究内容

系统总体设计：分析无人机典型应用场景的交互需求，提出涵盖硬件平台、通信链路、软件架构的总体方案，明确功能划分与接口标准。

硬件平台集成：完成以 Pixhawk 飞控和 Jetson Nano 机载计算机为核心的硬件选型、组装与调试，集成 915MHz 数传、5.8GHz 数字图传和遥控器接收机，构建稳定物理基础^[3]。

软件系统开发：机载端基于 Ubuntu 和 ROS 配置 MAVROS，开发状态监控、任务执行和视频流管理节点；地面端基于 Qt 框架开发地面站软件，集成 MAVLink 通信、三维可视化、航点规划等核心模块。

冗余链路机制：设计基于链路质量评估（心跳、RSSI、丢包率）的智能冗余通信链路管理与自动切换机制，提升系统复杂环境适应能力。

系统测试与验证：对系统通信链路性能、冗余切换效果及模拟任务飞行进行测试，用真实数据评估性能。

2. 主要创新点

全栈开源与深度集成：采用从飞控固件（PX4）、机载中间件（ROS）、通信协议（MAVLink）到地面站软件（自主开发）的全栈开源技术栈，实现深度集成与高度可控。

智能冗余链路管理：提出结合心跳检测、信号强度（RSSI）评估和自定义链路质量评分的仲裁算法，实现主备链路无缝平滑切换，优于简单超时切换策略^[4]。

可扩展软件架构：地面站软件采用模块化设计，通过插件机制方便集成新功能；机载 ROS 节点为高级算法提供标准接口。

二、系统总体方案设计

（一）系统需求分析

1. 功能需求

双向遥测通信：实时上传无人机位置、姿态等状态信息，可靠下发控制与任务指令。

FPV 视频传输：实时回传高清视频流，提供飞行视觉参考或远程监控。

多重控制模式：支持手动遥控、地面站指令控制及全自主航点飞行，模式间可安全切换。

航点任务规划：地面站提供图形化界面，规划航点、设置动作并上传任务。

参数配置与调参：读取和修改飞控参数，优化飞行性能。

数据记录与回放：机载和地面站记录飞行数据，供事后分析与算法验证。

状态监控与告警：实时监控关键信息，异常时触发声光告警。

安全保护机制：具备失控保护、地理围栏、低电量自动返航等功能。

2. 性能需求

通信距离：开阔地视距下，数传距离 ≥ 1.5 公里，图传距离 ≥ 2 公里。

通信延迟：控制指令 $\leq 200\text{ms}$ ，遥测更新 $\geq 10\text{Hz}$ ，视频流 $\leq 300\text{ms}$ 。

通信可靠性：指定距离内数传丢包率 $\leq 1\%$ 。

续航与负载：悬停时间 ≥ 20 分钟，可承载额外 1 公斤任务载荷。

3. 可靠性需求

冗余设计：关键通信链路具备冗余备份，主链路失效时自动切换至备份链路。

抗干扰能力：在 2.4GHz/5.8GHz WiFi 干扰环境下稳定工作。

故障处置：单一节点故障时，无人机按预设策略确保安全。

（二）系统总体架构

系统采用分层、模块化架构，分为空中端、通信链路和地面端三部分：1. 空中端：Pixhawk 飞控负责底层传感器融合、姿态解算与控制；Jetson Nano 运行 ROS，处理高级任务逻辑与传感器数据，充当通信桥梁；摄像头采集视频并处理后传输。2. 通信链路：采用三重独立链路，2.4GHz RC 控制链路传输低延迟遥控器指令；915MHz 双向数传链路传输 MAVLink 协议数据；5.8GHz 下行图传链路传输高清低延迟视频流。3. 地面端：主控笔记本运行自主开发地面站软件和 / 或 QGC，通过数传电台通信；操作员进行任务规划与监控，通过 RC 遥控器或地面站发送指令；图传接收机输出视频至显示器或 FPV 眼镜^[5]。

（三）通信协议栈设计

MAVLink 是轻量级消息编组库，专为资源受限系统和低带宽链路设计，采用头-载荷-校验和结构，支持消息编组、版本化，定义数百种标准消息类型，本系统采用 MAVLink v2.0 协议^[6]。系统通信协议栈为简化分层结构，MAVLink 协议位于应用层，承载控制、状态和任务消息，机载端 MAVROS 作为适配层，将 MAVLink 消息转换为 ROS 话题和服务，简化开发。

三、硬件系统设计与实现

（一）无人机平台总体设计

无人机机体采用高强度碳纤维 F550 六旋翼机架（配置为四轴模式），轴距 550mm，稳定性和负载能力良好。动力系统由 T-Motor MN2212 920KV 无刷电机、1045 自紧式尼龙螺旋桨和好盈 Skywalker40A 电调组成。电池采用 4S 10000mAh 35C 锂聚合物电池，提供充足能量，整机硬件布局兼顾重心平衡、散热和电磁兼容^[7]。

（二）飞控与机载计算机

1. Pixhawk 2.4.8 飞行控制器：基于 STM32F765 微控制器，拥有丰富传感器（IMU、磁力计、气压计）和接口（UART、I2C 等），运行 PX4 v1.13 固件，支持 EKF2 状态估计器、自适应控制律和 MAVLink 协议，配置为四轴“X”型并完成校准^[8]。

2. Jetson Nano 机载计算机：小型低功耗 AI 计算平台，搭

载四核 ARM Cortex-A57 CPU 和128核 Maxwell GPU，安装 Ubuntu 18.04 LTS 和 ROS Melodic，通过 UART 与 Pixhawk 连接，波特率 921600。

（三）通信链路硬件

1.915MHz SiK 数传电台：选用 Holybro 915MHz SiK V3，空中端功率 500mW，地面端 1W，915MHz 频段绕射能力强，与 2.4GHz RC 和 5.8GHz 图传频段分离，57600 波特率平衡延迟与可靠性。

2.DJI O3 Air Unit 图传系统：集成相机、图传发射机和天线，支持 1080p/60fps 视频传输，端到端延迟约 30ms，FCC 标准下最大通信距离 10 公里，通过专用线缆连接飞控和机载计算机。

3. RC 遥控器链路：采用 FrSky Taranis X9D Plus 遥控器与 R-XSR 接收机，工作于 2.4GHz 频段，支持 SBUS 输出，通过 SBUS 总线连接 Pixhawk 飞控，作为最高优先级手动控制通道。

（四）电源与布线设计

采用独立电源模块从主电池取电，为 Pixhawk 提供稳定 5V 电源；Jetson Nano 由独立电池或大电流 BEC 供电，避免电源争夺。所有设备共地，电源线与信号线分开捆扎，数传、GPS 天线远离强干扰源，确保天线垂直朝下安装。

（五）硬件系统集成与电磁兼容性考虑

集成后进行上电测试和电磁兼容性检查，在电机不转和空载慢速旋转状态下，监控飞控传感器数据、遥控器信号 RSSI 值和数传链路稳定性，验证无线通信在动力系统工作时的可靠性。

四、软件系统设计与实现

（一）软件系统总体架构

软件系统采用分布式架构，分为空中端和地面端软件，通过 MAVLink 协议和视频流交互。

（二）机载端软件设计与实现

1. 机载端软件运行于 Jetson Nano 的 Ubuntu 系统，核心为 ROS 框架：

基于 MAVROS 的通信中间件：配置 mavros 启动文件，建立与 Pixhawk 的串口连接，订阅 / 发布关键 ROS 话题和服务。

2. 状态监控与日志记录模块：开发 status_monitor 节点，检查飞控连接、GPS 定位、电池电压和通信链路等健康状态。

3. 任务管理与执行模块：mission_manager 节点解析和执行从地面站上传的 JSON 格式复杂任务。

4. 视频采集与流媒体模块：使用 GStreamer 管道采集视频并 H.264 编码，通过 UART 发送给 O3 图传发射机，UDP 视频流作为备用。

（三）地面站软件设计与实现

地面站软件为自主开发核心，采用 Qt 5.15 框架和 C++ 语言：

1. 软件框架与 GUI 设计：采用 MVC 模式，主界面包含地图 / 三维视图区、飞行仪表板等功能区域。

2. 数据链路管理与通信模块：使用 MAVSDK 库处理 MAVLink 通信，支持多种连接方式，实现冗余链路管理。

3. 飞行数据显示与三维可视化模块：用 Qwt 库绘制实时曲线，通过 Qt3D 和 Cesium 进行三维渲染。

4. 任务规划与参数调整模块：支持地图点击和表格编辑规划任务，通过 mavsdk::Param 组件获取和设置飞控参数。

5. 数据记录与回放分析模块：将数据记录到 SQLite 数据库，回放时可控速度重现飞行过程。

（四）冗余链路仲裁机制设计

系统默认 915MHz 数传电台为主链路，机载计算机 Wi-Fi 热点（UDP）为备用链路：

1. 链路状态评估：定义链路质量分数（LQS）= $w_1H + w_2(1 - PL) + w_3RSSI_{norm}$ （H 为心跳状态，PL 为丢包率）。

2. 切换决策逻辑：独立状态机周期性计算主备链路 LQS，根据评分结果决定是否切换。

3. 切换流程实现：地面站发送切换命令，机载端确认后切换主数据流，保持旧链路监听。

五、总结与展望

（一）工作总结

本文围绕四轴无人机与地面设备交互连接控制系统展开研究，明确系统需求，提出层次化架构和双链路通信方案。硬件上搭建以 Pixhawk 2.4.8 和 Jetson Nano 为核心的平台，适配相关通信设备；软件上构建 ROS 机载系统，开发 Qt/C++ 地面站软件，创新 LQS 冗余链路仲裁切换机制。经测试，系统各项性能达标，是稳定可靠、扩展性良好的交互控制平台。

（二）主要创新点

- 全栈开源深度定制，方案透明可控、可二次开发。
- 多维度评估的冗余链路切换机制，提升抗干扰能力。
- 模块化与标准化设计，便于功能扩展和算法集成。

（三）不足与展望

未来将升级 4G/5G 通信实现超视距作业，集成实时避障、动态目标跟踪功能，优化 VR/AR 人机交互，增强通信加密与空域感知，对接云平台支持多机协同。

参考文献

- [1] Meier L, Honegger D, Pollefeys M. PX4: A node-based multithreaded open source robotics framework for deeply embedded platforms[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2015: 6235-6240.
- [2] Koubaa A, Alajlan M, Qureshi B. ROS: An open-source robot operating system tutorial[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2017, 87(1): 19-31.
- [3] 王鹏, 陈金勇, 刘锦涛. 基于 MAVLink 的无人机地面站系统设计[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(11): 3489-3494.
- [4] 张洋, 李斌, 刘艳. 基于 ROS 和 PX4 的无人机控制系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(5): 214-218.
- [5] Chao H, Cao Y, Chen Y. Autopilots for small unmanned aerial vehicles: A survey[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2010, 8(1): 36-44.
- [6] DJI O3 Air Unit User Manual V1.0.2022.
- [7] Holybro. Pixhawk 2.4.8 Autopilot User Manual. 2021.
- [8] MAVLink Developer Guide. <https://mavlink.io/en/>. Accessed: Oct. 26, 2023.