

doi: 10.7690/bgzdh.2026.02.016

# 无人机飞行控制关键技术国产化替代

羊进<sup>1</sup>, 李定刚<sup>2</sup>, 王世勇<sup>1</sup>, 廖士楠<sup>1</sup>

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司无人机事业部, 四川 绵阳 621000; 2. 海军装备部, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 针对无人机飞控板卡的核心处理器和操作系统多数是基于国外解决方案的问题, 设计和采用国产化替代方案, 实现无人机飞行控制自主化。从飞控板卡的核心处理器国产化替代、操作系统国产化替代以及适配等方面进行分析与设计。在飞控板卡方面, 重点研究了 PIXHAWK V2.4.8 的工作原理, 分析将 STM32 替换为 GD32 的可行性。在 PX4 飞控的操作系统移植方面, 重点分析现有 PX4 运行的 NUTTX 操作系统替换为国产欧拉操作系统的可行性。已初步实现基于 PIXHAWK V2.4.8 的 GD32 主控芯片替换、国产欧拉操作系统与 PX4 代码的适配等工作。结果表明, 采用国产化替代方案切实可行, 能为无人机飞控的核心技术实现自主化替代提供参考依据。

**关键词:** 无人机; 飞行控制; 核心处理器; 操作系统**中图分类号:** V279 **文献标志码:** A

## Domestic Substitution of Key Technologies for UAV Flight Control

Yang Jin<sup>1</sup>, Li Dinggang<sup>2</sup>, Wang Shiyong<sup>1</sup>, Liao Shinan<sup>1</sup>

(1. Department of UAV, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China; 2. Naval Equipment Department, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** In view of the problem that most of the core processors and operating systems of UAV flight control board are based on foreign solutions, the design and implementation adopt domestic alternatives to realize UAV flight control autonomy. The analysis and design are carried out from the aspects of domestic substitution of the core processor of the flight control board, domestic substitution of the operating system and adaptation. In the aspect of flight control board, the working principle of PIXHAWK V2.4.8 is mainly studied, and the feasibility of replacing STM32 with GD32 is analyzed. In the aspect of operating system transplantation of PX4, the feasibility of replacing the existing NUTTX operating system running on PX4 with the domestic Euler operating system is analyzed. The replacement of GD32 master chip based on PIXHAWK V2.4.8 and the adaptation of domestic Euler operating system to PX4 code have been preliminarily realized. The results show that the domestic substitution scheme is feasible, and it can provide a reference for the realization of autonomous substitution of the core technology of UAV flight control.

**Keywords:** UAV; flight control; core processor; operating system

## 0 引言

近年来, 随着无人机技术的发展, 尤其是自主化、智能化、集群协同技术<sup>[1-4]</sup>等方面的发展, 无人机在军民领域都得到了广泛应用。操作系统<sup>[5-6]</sup>作为无人机飞行控制(以下简称飞控)衔接硬件抽象层和功能模块算法层的中介, 具有很高的地位。据悉, 信息和通信技术(information and communications technology, ICT)产业处在“缺芯少魂”的状态。在解决“少魂”问题上, 华为通过研制出的欧拉操作系统<sup>[7]</sup>, 打造覆盖所有场景的操作系统。欧拉操作系统的定位是瞄准国家数字基础设计的操作系统和生态底座, 承担着支撑构建领先、可靠、安全的数字基础。欧拉操作系统支持服务器、云计算、边缘计算、嵌入式等应用场景, 支持多样性计算, 致力于提供安全、稳定、易用的操作系统, 应用场景

覆盖信息技术、通信技术和操作技术, 可实现统一操作系统并支持多设备<sup>[8]</sup>, 具有应用一次开发覆盖全场景的特性。欧拉系统可为无人机的算法层和应用层提供必要的基础设施, 保障无人机运动控制功能的顺利实现。通过使用 GD32 主控芯片替换现有开源飞控板卡中的 STM32 主控芯片后开展硬件适配, 可实现硬件国产化的自主可控, 为飞控程序的正常运行提供保障; 因此, 通过对现有飞控系统的操作系统替换为欧拉操作系统, 更换现有飞控板卡的核心处理器为国产 GD32 系列具有重要的研究意义。

## 1 设计目标

### 1.1 主要任务

该设计的飞控关键技术国产化替代的验证平台采用气动性优越的四旋翼无人机<sup>[9-10]</sup>。通过国产化

收稿日期: 2024-11-09; 修回日期: 2024-12-11

第一作者: 羊进(1996—), 男, 四川人, 硕士。

替代后，在国产化自主可控飞控板卡上运行欧拉操作系统以及开源飞控 PX4，实现位姿解算、位姿控制以及导航等功能模块。通过搭载机载计算机、数据采集传感器，实现激光测距、图像处理、室内定位等功能。满足欧拉操作系统移植任务需求的同时，完成飞控板卡的国产化核心处理器替换，实现飞控操作系统下飞控算法的移植。通过搭建四旋翼无人机验证平台，展示室内外避障、室内外定点悬停等功能。

## 1.2 主要功能

- 1) 飞控板卡具备欧拉操作系统、主控芯片为 GD32 系列等自主可控能力；
- 2) 无人机具备自主起降、一键返航等功能；
- 3) 无人机具备室内外避障与定位、航迹规划等功能；
- 4) 无人机具备在低电量与失联自动返航的安全保护功能。

## 2 飞控关键技术国产化替代的设计方案

笔者用国产化 GD32 芯片替代基于 PIXHAWK V2.4.8 开源飞控板卡中的 STM32 芯片，并与开源飞控固件 PX4 的适配。考虑到操作系统在飞控系统的重要地位，选择将主流的欧拉操作系统应用在飞控系统中，具体为通过使用欧拉操作系统替换开源飞控 PX4 中的 Nuttx 操作系统，并实现与国产化 GD32 芯片替代后的移植、验证。

### 2.1 飞控板卡的设计

#### 2.1.1 PIXHAWK V 2.4.8 的分析

PIXHAWK 作为目前主流算法验证的硬件平台具有较为丰富的应用价值。笔者采用该板卡作为无人机关键技术国产化替代的验证主体。PIXHAWK V2.4.8 飞控板卡包括 2 块处理器，即主处理器为 32 位 STM32F427 和协处理器为 32 位 STM32F103。如图 1 所示，STM32F427 作为 PX4 的 FMU (主控芯片，实现算法运行)，STM32F103 作为 PX4 的 IO (负责通道的输出)。

主处理器 STM32F427 负责各种传感器数据读取、姿态解算、位姿控制、PWM 控制量计算以及与 PXIO 通信等功能。从处理器 STM32F103 负责处理输入、输出的部分，输入为支持各类遥控器 (PPM、SPKT/DSM、SBUS)，输出为电调的 PWM 驱动信号，并与 PX4FMU 通过串口进行通信。在该设计中将实现对 2 块处理器的国产化替换各自工作以及相

互通信功能。

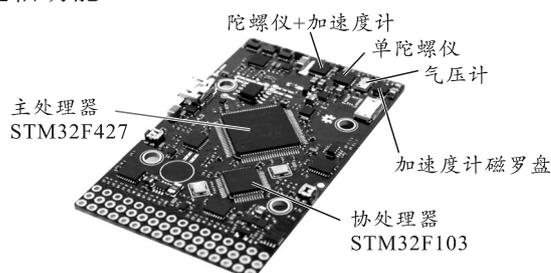


图 1 PIXHAWK V2.4.8 主从处理器及传感器

#### 2.1.2 GD32 原位替代 STM32 可行性分析

通过使用国产化 GD32 系列进行 PIN 对 PIN 物理替换，在 PX4 代码驱动中替换 STM32 相应功能，完成软、硬件的国产化核心可控。通过查阅调研，具体 STM32 系列替换为 GD32 系统的情况如表 1—2 所示。

表 1 STM32F427 和 GD32F420 的替换方案

序号	GD 型号	脚位	ST 型号
1	GD32F450VET6	pin-pin 兼容可替代	STM32F427VET6
2	GD32F450VGT6	pin-pin 兼容可替代	STM32F427VGT6
3	GD32F450VIT6	pin-pin 兼容可替代	STM32F427VIT6
4	GD32F450VKT6	pin-pin 兼容可替代	STM32F427VKT6

表 2 STM32F103 和 GD32F103 的替换方案

序号	GD 型号	脚位	ST 型号
1	GD32F106TBU6	pin-pin 兼容可替代	STM32F106TBU6
2	GD32F107C4T6	pin-pin 兼容可替代	STM32F107C4T6
3	GD32F108C6T6	pin-pin 兼容可替代	STM32F108C6T6
4	GD32F109C8T6	pin-pin 兼容可替代	STM32F109C8T6
5	GD32F110CBT6	pin-pin 兼容可替代	STM32F110CBT6

#### 2.1.3 引脚电压分析

电源引脚上，STM 芯片和 GD 芯片数量及功能分布一致，在电压范围存在差异。其中，STM 的 VDD、VDDA、VBAT 电压范围分别为 1.8~3.6 V、1.8~3.6 V、1.65~3.6 V，GD 的范围分别为 2.6~3.6 V、2.6~3.6 V、1.8~1.6 V。仍存在较大范围的重合区间，STM32 的供电电路可为 GD32 的电路提供电源。

#### 2.1.4 引脚功能分析

##### 1) UART。

关于 UART，飞控电路上用到的为 FMU-UART4、FMU-UART7 以及 FMU-UART8，每个端口均对应 2 个 PIN。在 STM 芯片上对应的引脚为 PA0&PA1 (FMU\_UART4)、PE7&PE8 (FMU\_UART7) 以及 PE0&PE1 (FMU\_UART8)。STM 芯片上可支持高达 4 组 UART 接口；但在 GD32 芯片上只支持 2 组 UART (UART3、UART4)。GD 芯片的 UART3

对应的 pin 为(PA0&PA1)，可以原位置替换。GD 芯片另外一组具有 UART 功能的 UART4 的 pin 为(PC12&PD2)，但与 SD 读取冲突。因 GD 只存在 2 个原生 UART 端口，则对于 FMU\_UART7 和

FMU\_UART8 的实现，可与 SD 读取功能复用，再加上 UART；或者借用 2 个 USART，借以替换实现 UART。STM32 和 GD32 的 UART 对比情况如表 3 所示。

表 3 STM32 和 GD32 的 UART 对比

原理图功能	引脚名	STM 对应引脚功能	GD 对应引脚功能	替换方案
FMU_UART4_TX	PA0	UART4_TX	UART3_TX	原位替换
FMU_UART4_RX	PA1	UART4_RX	UART3_RX	原位替换
FMU_UART7_RX	PE7	UART7_RX	无 UART 功能	其他代替
FMU_UART7_TX	PE8	UART7_TX	无 UART 功能	其他代替
FMU_UART8_RX	PE0	UART8_RX	无 UART 功能	其他代替
FMU_UART8_TX	PE1	UART8_TX	无 UART 功能	其他代替

2) SPI。

关于 SPI，飞控电路上为 SPI\_INT、SPI\_EXT 和 SPI\_INT\_MAG 共 7 个 pin。在 STM32 芯片上，对应的引脚为 PA5、PA6、PA7、PE2、PE5、PE6 以及 PC1。在 GD32 上，存在 3 组 SPI。查询资料可知 (PA5、PA6、PA7) 对应实现 (SPI0\_SCK、SPI0\_MISO、SPI0\_MOSI)。此外，实现的另一组 SPI\_EXT、GD 对应的 (PE2、PE5、PE6) 无默认功能的 SPI 功能。寻找 GD 中具有 SPI 功能的 pin 脚。对于 GD 提供的 3 组 SPI，除上段的 SPI0 的(PB5、PA6、PA7)一组外，还有实现 SPI1 的 PA9 (SPI1\_SCK 与 VBUS 冲突)，PB10 (SCK 与 I2C\_SCL 冲突)，PB13 (实现 SPI1\_SCK 与 FRAM\_SCK 冲突)，

PB14 (可实现 MISO 但与 FRAM\_MISO 冲突)，以及 PB15 (实现 MOSI 但与 FRAM\_MOSI 冲突)。另外，对于剩下的 SPI2，GD 上能实现的 pin 脚为 PB0 (SPI2\_MOSI 但可能与 EXTERN\_DRDY 冲突)，PB2 (可实现 SPI2\_MOSI 但与 BOOT1 冲突)，PB3 (实现 SPI2\_SCK 但与 TRACESWO) 冲突，PB4 (可实现 SPI2\_MISO 无冲突)，PB5 (可实现 SPI2\_MOSI，但与 VDD\_BRICK\_VALID 冲突)，PC1 (实现 SPI2\_MOSI，但与 SPI\_INT\_MAG\_CS 冲突)，PC10 (SPI2\_SCK，但与 SDIO\_D2 冲突)，PC11、12 (可实现 SPI2\_MISO、MOSI，但与 SDIO\_D3、CK 冲突)，PD0、PD6 仍有冲突。STM32 和 GD32 的 SPI 接口对比情况如表 4 所示。

表 4 STM32 和 GD32 的 SPI 接口对比

引脚名称	原理图功能	STM32 引脚功能	GD32 引脚功能	替换方案
PA5	SPI_INT_SCK	SPI1_SCK	SPI0_SCK	原位替换
PA6	SPI_INT_MISO	SPI1_MISO	SPI0_MISO	原位替换
PA7	SPI_INT_MOSI	SPI1_MOSI	SPI0_MOSI	原位替换
PE2	SPI_EXT_SCK			不能
PE5	SPI_EXT_MISO		无对应功能	不能
PE6	SPI_EXT_MOSI			不能
PB3	FMU-SWO	JTDO/TRACESWO	JTDO/SPI0_SCK	不能
PA9	VBUS	OTG_FS_VBUS	USBFS_VBUS/SPI1_SCK	不能
PB0	EXTERN_DRDY	电平输入	EVENTOUT/SPI2_MOSI	尝试 PE 替换
PB3	TRACESWO	TRACESWO	TRACESWL/SPI2_SCK	与 swo 复用
PB4	Future Use		SPI2_MISO	尝试 PE 替换

由此可得，GD32 只有一组 SPI 可原位置替换 STM32 的 SPI。另外一组 SPI 的实现需要更换接口，用 PB0、PB3、PB4 来实现 SPI2，而 PB0 至 4 原先的功能用 PE2 至 5 替换。PB3 的功能需要和 SWO 复用。

3) I2C。

对于 I2C 的实现，飞控电路图中，使用 2 组 I2C。每组 I2C 用到 2 个 pin，对应于 I2C\_SCL、I2C\_SDA。

在 STM32 芯片上，FMU-I2C1-SCL 和 FMU-I2C1-SDA 对应的 pin 脚为 (PB8、PB9)，另

外一组对应为 (PB10、PB11)。在 GD 芯片上，对应引脚的功能为 (I2C0\_SCL 和 I2C0\_SDA，I2C1\_SCL 和 I2C1\_SDA)，接口对比如表 5 所示。

表 5 STM32 和 GD32 的 I2C 接口对比

引脚名称	Fuction	STM32 引脚描述	GD32 引脚描述	替换方案
PB8	FMU-I2C1_SCL	I2C1_SCL	I2C0_SCL	原位替换
PB9	FMU-I2C1_SDA	I2C1_SDA	I2C0_SDA	原位替换
PB10	FMU-I2C2_SCL	I2C2_SCL	I2C1_SCL	原位替换
PB11	FMU-I2C2_SDA	I2C2_SDA	I2C1_SDA	原位替换

由此可得，为 I2C 总线的实现，对应 pin 脚无

需变动。

4) 片间通信。

单一的 F427 芯片并不能提供足够多的接口来完成飞控的复杂功能和控制，需要 STM32F101/103

芯片来辅助。

考虑 STM32F427 和 STM32F103 之间的通信功能，STM32 和 GD32 的片间通信引脚对比情况如表 6 所示。

表 6 STM32 和 GD32 的片间通信引脚对比

引脚名称	功能	STM32 描述	GD32 描述	替换方案
PC6	SERIAL_FMU_TO_IO	USART6_TX	USART5_TX	原位替换
PC7	SERIAL_IO_TO_FMU	USART6_RX	USART5_RX	原位替换

经过上面的对比分析替换后，最终设计的基于 GD32 系列芯片的飞行控制板卡实现了 PIXHAWK 飞控板卡且基于 STM32 系列芯片的原位替代，所设计的欧拉飞控板如图 2 所示。

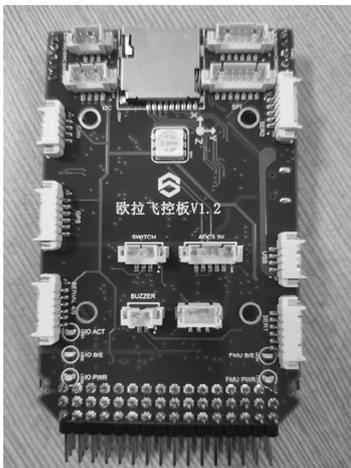


图 2 欧拉飞控板 V1.2

2.2 操作系统的设计

操作系统是配置在计算机硬件上的第一层软件，其主要作用是管理硬件设备，提高设备的利用率和系统的吞吐量，并为用户和应用程序提供一个简单的接口，便于用户使用。笔者照欧拉系统理念，提出了无人机欧拉系统组成：任务控制接口、任务调度接口、调度控制接口、消息队列接口、信息量接口、环境变量、文件系统接口、网络接口。如图 3 所示，欧拉操作系统的层级划分为硬件层、操作系统层、算法层以及应用层 4 层。

欧拉操作系统主要负责 PX4 核心算法的应用底层驱动和位姿解算、位姿控制以及导航算法的运行，具体包括无人机数据驱动获取、姿态解算算法、姿态控制算法、位置解算算法、位置控制算法、导航算法以及自主飞行算法等。目前，在 PX4 固件中使用的实时操作系统是基于 Linux 架构的 NUTTX 操作系统，接下来对 NUTTX 操作系统使用情况、在 PIXHAWK 使用地位、用户接口、NSH 等使用进行梳理。

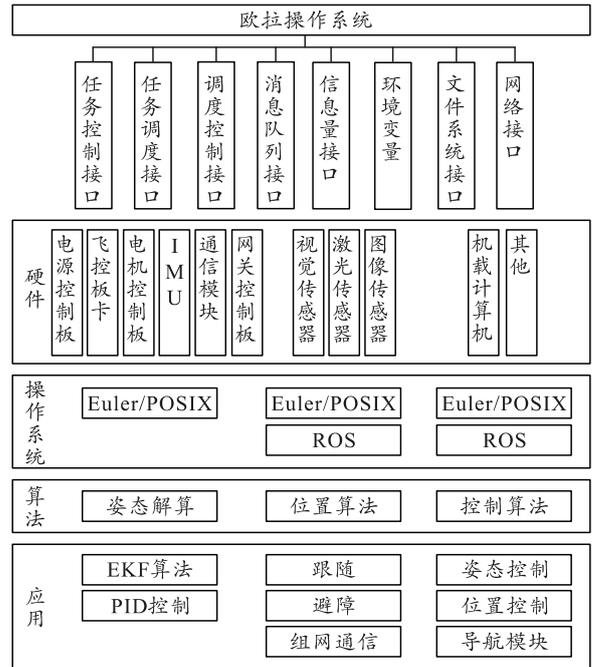


图 3 无人机欧拉操作系统

2.2.1 NUTTX 操作系统

PX4 源码目前可运行在 NUTTX、QURT 以及 POSIX(一种 3 维引擎仿真操作系统平台)3 种操作系统中。NUTTX 是一个基于 Linux 架构的嵌入式实时操作系统(embedded real-time operation system, RTOS)。NUTTX 所支持的平台有很多，在 PIXHAWK 平台上所依赖硬件处理器的是 STM32F427。在 NUTTX6.27 中为 F427/437 系列提供了系统构架。具体支持包括 STM32F427I、STM32F427Z 和 STM32F427V 芯片。F427/437 端口增加了额外的 SPI 端口和 UART 端口、I2C 端口上的模拟和数字噪声滤波器、2MB 的闪存等。NuttX 操作系统也为用户提供任务控制接口、任务调度接口、调度控制接口、消息队列接口、信息量接口、环境变量、文件系统接口和网络接口等。此外，NSH Library 为 NuttX 提供了一个简单的 shell 应用程序。NuttX 系统下的 apps/nshlib 子目录包含 NuttShell(NSH)。使用该库可以轻松生成 NSH 应用程序。

### 2.2.2 基于欧拉操作系统的 PX4 适配

笔者设计的飞控操作系统可以为无人机的算法层和应用层提供必要的基础设施，保障无人机运动控制功能的顺利实现。相对于上层的算法和应用，飞控操作系统环境可以大致分为系统内核、系统基础工具与库、无人机控制基础工具 3 层，如图 4 所示。

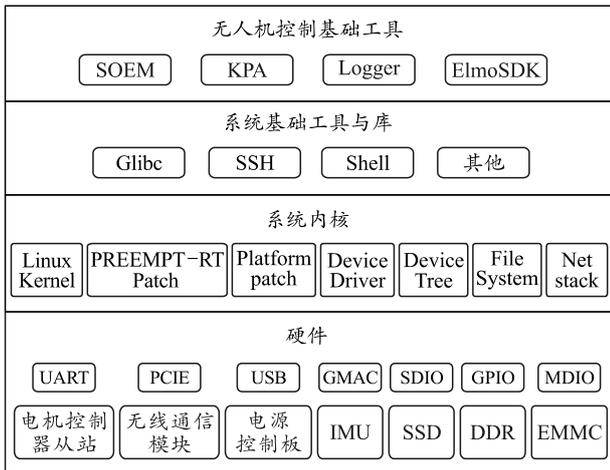


图 4 欧拉操作系统分层模块

#### 1) 系统内核。

系统内核基于 Linux 内核构建，由 Linux 内核提供操作系统的进程调度、线程通信、设备驱动等基础设施。

**PREEMPT-RT Patch:** Linux 内核的实时性补丁。操作系统通过该补丁具备实时性特性，进而满足运动控制的实时性要求。

**Platform Patch:** Linux 内核的额外硬件平台补丁。操作系统通过该补丁实现对 PIXHAWK 硬件平台的完整支持，因为开源的 Linux 内核架构支持代码中不一定会包含所有的硬件特性支持。

**Device Driver:** Linux 内核的设备驱动，用于实现操作系统对硬件物理设备的操作接口和功能。

**Device Tree:** Linux 内核设备树，是描述硬件设备信息的数据结构，便于操作系统的内核可以方便管理和使用这些硬件，同时可以让操作系统的驱动代码与物理硬件平台实际信息减少耦合。

**File System:** 文件系统，是储存和组织数据的方法，也是这些方法的具体代码实现，用于操作系统自身的文件储存、无人机运行过程中产生的数据储存等。

**Net Stack:** 网络协议栈，即处理网络通信协议的网络控制软件，实现基础的网络数据包传递和处理，面向上层应用提供统一的操作接口，为无人机

的内、外部网络通信提供了基础设施。

#### 2) 系统基础工具与库。

该层次属于操作系统内核之外，但随操作系统一同提供，受操作系统软件包工具管理，无差别为各种应用提供支撑的基础运行环境。

**Glibc:** GNU C Library，是自由软件基金会 (free software foundation, FSF) 编写的自由、开源的 C/C++ 运行库，以 LGPL 协议发布，为 Linux 内核提供了最基础的 API。

**SSH:** Secure SHell，是一种由 IETF 的网络小组所制定的安全网络协议，用于操作系统的远程安全登录和数据传输。在飞控操作系统中使用开源实现版本 OpenSSH。该协议在无人机中用于远程遥控和系统远程登录调试等任务。

**Shell:** 为操作系统使用者提供字符操作界面的软件，也是一种编程语言，操作系统使用者可通过它来让操作系统执行相应的命令。该工具在无人机操作系统的自动化配置、控制、远程登录调试等任务中皆会发挥作用。

#### 3) 无人机控制基础工具。

该层次提供操作系统内核之外的工具包，但应用场景更有针对性，仅面向无人机控制。

**SOEM:** Simple Open EtherCAT Master，由 RT-Labs 开发的开源 EtherCAT 主站协议栈，适用于嵌入式平台，用于无人机伺服驱动器的通信控制，为 ElmoSDK 以及上层应用的运动控制功能提供支持。

**KPA:** 适用于嵌入式平台，支持多种操作系统。在现有的无人机产品中被用于伺服驱动器的通信控制。该软件栈在新的无人机设计中为对比测试作支持。

**Logger:** 代表日志记录软件，为无人机运行期间的日志记录功能提供支持。

**ElmoSDK:** 开源的、用于与 Elmo 公司伺服驱动器进行 EtherCAT 通信的软件开发包，对应电机控制使用的 Elmo 伺服驱动器，为上层应用的运动控制功能提供支持。

完成对飞控操作系统的设计后，进行 PX4 飞控与飞控操作系统适配，完成飞控系统的所有功能均通过任务进程实现，主要包括传感器数据采集、姿态解算、遥控器数据采集、姿态控制、数据通信及日志记录等进程。进程间通信是飞控系统软件架构的重要组成部分，PX4 采用 UORB (一种微对象处理器) 来实现，UORB 实际上是多个进程打开同一个设

备文件，进程间通过此文件节点进行数据交互和共享。进程通过命名总线交换的消息称之为主题，一个主题仅包含一种消息类型。每个进程可以订阅或者发布主题，其程序流程如图 5 所示。

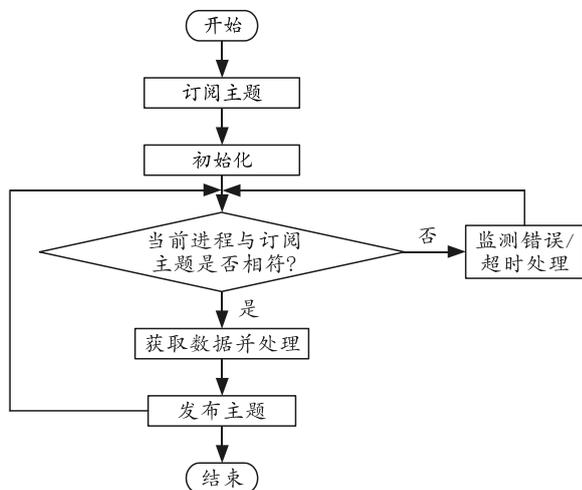


图 5 发布/订阅主题程序流程

一个主题可以存在多个发布者，或者一个进程可以订阅多个主题，但是一条总线上始终只有一条消息，进程并不用关注信息交换的对象。这种机制可高效简洁地实现进程间数据的共享，进而提高程序开发效率。基于上述的 UORB 机制，无人机飞控系统进程中飞控操作系统的运行情况如图 6 所示。

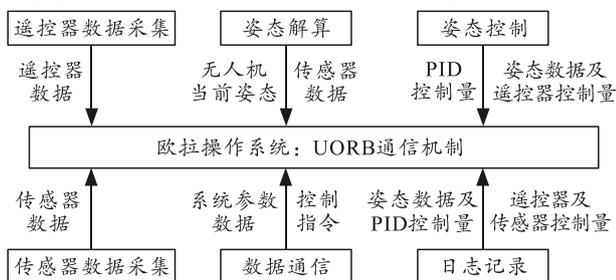


图 6 UORB 机制

图 6 中姿态解算进程利用传感器采集进程得到的数据实时解算出飞行器当前姿态；姿态控制进程订阅遥控器及姿态数据，计算出当前所需的 PID 控制，并推送至 UORB；数据通信进程将接收到的控制指令发布，同时订阅系统各个参数数据；日志记录进程从 UORB 处得到系统数据后进行存储。

### 3 平台搭建与验证

#### 3.1 系统组成

欧拉无人机由四旋翼无人机、HOMER 数传(地面端一个，无人机配备空中端 HOMER 数传)、地面端 PC、备品备件等分系统组成，如图 7—8 所示。

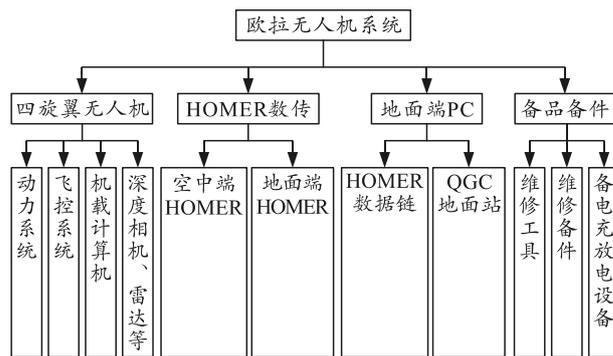


图 7 欧拉无人机组成



图 8 欧拉无人机

欧拉无人机系统是在阿木实验室基于 Prometheus 开源项目的功能模块基础上进行搭建，可实现指点飞行、轨迹跟踪、激光避障、框选跟踪等功能，具有二次开发的特性。Prometheus 框架中外部的定位模块由深度相机、GPS 等组成，解决无人机室外、室内定位问题。此外，也可以通过 SLAM 建图的方式将无人机所处环境的 3 维模型定位建图。通过以上 2 种方式获取到无人机位置控制的实际位置输入，但要实现位置控制模块还需获取无人机实时的期望位置。在 Prometheus 中通过任务模块实际得到无人机的期望位置。其中，单目相机、深度相机将获取的图像进行目标检测解算后的数据可以作为任务模块的输入，SLAM 模块的数据亦可通过规划模块得到任务模块的输入量。从而实现无人机的实时期望位置，与实际解算位置在 PX4 飞控中实现 P-PID 控制，实现无人机自主飞行。自主飞行原理如图 9 所示。

#### 3.2 各模块的设计

##### 1) 欧拉无人机。

无人机由机体平台、数传模块、动力模块、飞控模块、机载计算机和数据采集设备等组成。机体平台采用四轴，轴上采用正反软质螺旋桨，这种设计可迅速实现位姿改变，提升无人机响应速度。动力装置由电机、电调、螺旋桨以及锂电池组成，系统采用无刷直流电机，配合螺旋桨，提供超强的负

载能力。飞控模块由飞控板卡、GPS、外置磁罗盘 等模块构成。

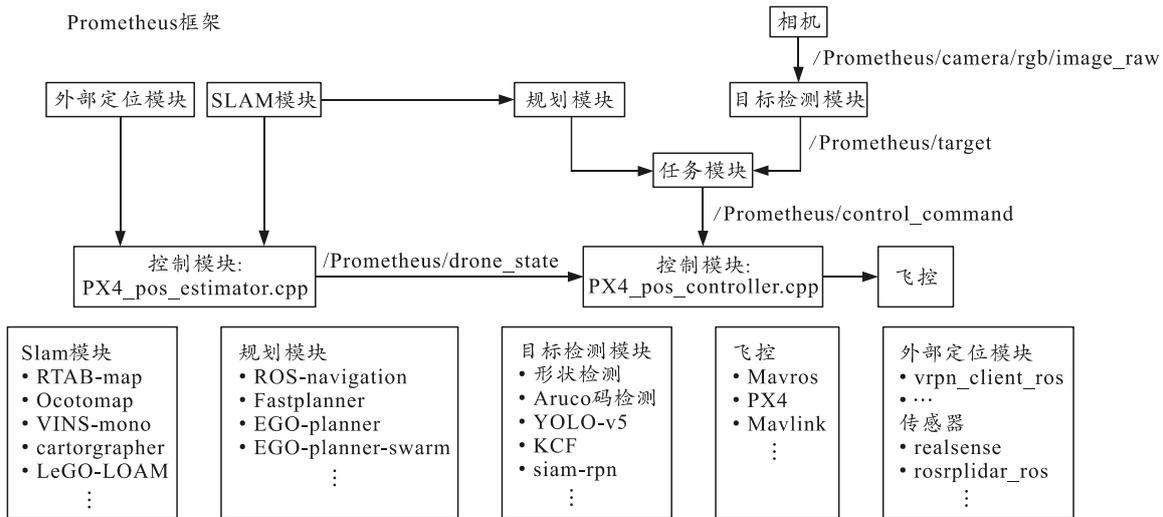


图 9 自主飞行原理

2) 机载计算机。

机载计算机由 CPU、GPU 和对应的实时操作系统组成(该设计使用 Ubuntu 操作系统),要求实时性强,任务执行频率上百赫兹,可以快速地控制电气系统,强调响应的实时性且相对简单可靠,确保被控对象的平衡稳定。

机载计算机需要实现的功能如下:

- ① 借助 Mavros 功能包实现机载电脑与飞控板卡的通信;
- ② 实时监控飞控板卡状态,为机载控制及导航模块提供状态反馈;
- ③ 提供避障算法、跟随算法以及 EKF 算法实现对外部数据采集设备的信息处理;
- ④ 安装好 PX4\_Command 的 ROS 开发包,支持速度控制、位置控制。

3) 图像及激光数据采集模块。

无人机实现自主飞行的数据来源是通过 T265 双目相机、深度相机 D435i、单目相机获取图像信息以及激光雷达获取的激光测距信息。获取的信息通过在机载计算机 CPU 进行核心算法处理后得到无人机期望位置、速度等,并通过 Mavros 发送至 PX4 内部通信协议后,使用 UORB 订阅/发布消息的通信机制给到无人机位置控制中的期望位置,期望位置 and 实际位置进行 P-PID 控制,从而实现自主飞行。

4) HOMER 数传。

无人机通信数据链拟采用阿木实验室的 HOMER 数传。该产品是一款宽带接入及数据传输产品。支持“点对点”及“点对多点”传输方式,

远距离、宽带自组网传输模块。可以工作在 2.4 GHz、1.4 GHz、800 MHz 3 个频段内,满足用户复杂场景的远距离视频及数据传输需求。

5) 地面端 PC。

无人机地面站系统集成数据传输、图形显示、航迹规划以及数据存储等功能于一体。通过 Mavlink 通信协议与无人机建立通信,实现对无人机飞控板卡的遥测与遥控。遥测通道主要负责设置无人机各种飞行模式和飞行数据的实时监控。地面站可以读取保存在飞控板卡中的飞行数据,并对飞行任务进行回放和分析。PX4 飞控使用 QGC 地面站。

4 结束语

笔者针对无人机关键技术国产化替代,提出关于无人机飞行控制系统国产化替代的解决方案,分析飞行控制系统关键技术及解决途径。遵循模块化、系列化和标准化的设计思想,采用基于现有成熟的硬件方案并进行适应性改进,可为无人机飞行控制系统的国产化替代提供较为重要的参考。

参考文献:

- [1] 许为乐,李春涛.基于速度协同一致的分布式无人机集群技术[J].兵工自动化,2025,44(1):102-109.
- [2] 蔡营盈,王伟,王长城,等.基于向心力启发的多层次无人机编队避障[J].兵工自动化,2025,44(3):93-97.
- [3] 高晓博.小型固定翼无人机集群编队快速集结及一致性控制技术[J].兵工自动化,2025,44(7):88-93.
- [4] 刘伟,刘景尚,谭左红,等.一种无人机集群编队策略及阻滞方法研究[J].兵工自动化,2025,44(10):81-85.