

主流开源飞控项目

- **ArduPilot** – 历史悠久的开源飞行控制软件，支持多种载具（多旋翼、固定翼VTOL、旋翼机、地面及水下载具等）¹。代码量巨大（多百万行），采用 C/C++ 和 Lua 脚本，近年来切换到 ChibiOS RTOS²。应用范围广泛（装机数百万），社区活跃，NASA、Intel 等机构使用。常见硬件：Pixhawk、Cube、Navio2 等³。
- **PX4** – 专业级开源飞控，由 Dronecode 基金会维护，架构模块化、灵活⁴。支持多旋翼、固定翼、各种 VTOL、地面车和 underwater 航行器等多种载具⁵⁴。原生运行在 Pixhawk（STM32/NuttX）硬件，也可跑在 Linux 机载计算机上⁶。代码结构相对清晰，社区活跃（官方文档齐全、经常召开开发者会议）。
- **Paparazzi UAV** – 法国 ENAC 开发的开源飞控，定位学术研究。支持多旋翼、固定翼及一些混合型 VTOL 平台⁷。硬件平台包括 Lisa/S、Apogee 等开源板卡。代码基于 C/C++（采用 ChibiOS），强调可定制性。社区规模较小，适合科研和教育用途⁸⁹。
- **其他飞控** – LibrePilot（原 OpenPilot，偏向多旋翼，界面友好）¹⁰；Betaflight（竞速四旋翼固件，专注高速响应）¹¹；iNav（从 Cleanflight 演变，强化导航功能，支持多旋翼/固定翼/地面车）¹²。这些针对竞速或导航应用的飞控开源，但功能集中于多旋翼，对 VTOL 支持较弱¹³¹⁴。

入门模块与仿真环境

- **ArduPilot 入门**：可先学习 `ArduCopter` 的稳定悬停和自动起降模块，利用开源地面站（Mission Planner）配置参数和加载飞行任务。仿真方面，ArduPilot 提供 SITL（软件在环）支持，可与新版 Gazebo 结合使用¹⁵；也可使用 X-Plane、FlightGear 等传统飞行模拟器¹⁶。官方文档有 Gazebo 插件教程¹⁵，方便新手在虚拟环境中验证飞行控制算法。
- **PX4 入门**：推荐从多旋翼（MC）模式入手，例如在 Gazebo 或 [jMAVSim](#) 中运行悬停示例。PX4 官方提供 QtCreator 仿真环境，也支持 Gazebo 和 [AirSim](#)¹⁷。AirSim 由微软开发，可模拟真实天气和传感器，非常适合测试视觉/AI算法¹⁷。此外，PX4 支持 Offboard 模式，可让机载计算机通过 MAVSDK（Python/C++ 接口）发送控制指令。PX4 入门示例可参考官方文档（如 Gazebo 仿真教程）、用户社区以及硬件平台（如 Pixhawk + QGroundControl 示例）。
- **Paparazzi 入门**：可通过 Paparazzi Center 地面站创建飞行计划并进行仿真。Paparazzi 原生支持 JSBSim 航空动力学仿真和 FlightGear 可视化¹⁸。新手可先运行已有的四旋翼或固定翼示例任务，观察自动导航过程。由于 Paparazzi 强调研发，可参考官方教程和样例飞控板（如 Lisa/M）进行实践。
- **其他飞控入门**：LibrePilot 和 Betaflight 均提供 Windows/Linux 下的配置软件（GCS），适合快速调参。新手可使用 Betaflight 配置竞速四旋翼，学习姿态控制原理。iNav 强化了 GPS/定点导航，可参考其官方 Wiki 学习固定翼和多旋翼导航功能。尽管这些项目不专门针对 VTOL，但它们的定位控制和姿态控制模块对多旋翼入门具有参考价值。

学习路径建议

1. **夯实航空电子基础**：首先学习无人机基本原理，包括飞行器姿态定义（俯仰、偏航、横滚）¹⁹、常用传感器（陀螺仪、加速度计、气压计、磁罗盘、GPS 等）²⁰，以及基本的控制算法（如 PID 控制）。可阅读 CSDN 等博客（如“无人机飞控基础知识”²⁰）或高校教材，了解传感器融合（AHRS/INS）与四旋翼动力学。
2. **构建开发环境**：根据官方文档安装飞控固件开发环境。ArduPilot 文档提供 SITL 配置教程，支持 Gazebo 等仿真¹⁵；PX4 官方 Guide 可在 Ubuntu/macOS 上编译并运行 SITL（jMAVSim/Gazebo/AirSim）。在模拟器里验证飞控功能，调试 MAVLink 通讯和参数，熟悉地面站（QGroundControl/Mission Planner）操作。
3. **从简单模块入手**：先从最基本的飞行模式和算法开始，例如定点悬停（Stabilize/AltHold 模式）、自动起降、路径跟踪任务等⁵。阅读源码时，可先关注姿态控制、位置控制等核心模块。逐步尝试修改或新增小模块，如在 ArduPilot 中实验自定义 Lua 脚本，或在 PX4 中添加简单应用（参见官方“创建第一个 PX4 应用”教程）。
4. **借助多媒体与社区**：利用视频教程和在线课程加深理解。例如，许多高校和培训机构提供无人机控制课程（如学堂在线“无人机飞行控制”²¹），Bilibili 上有大量 PX4/ROS 教学视频。此外，加入 ArduPilot/PX4 社区（Slack、论坛、GitHub）交流，关注官方开发会议和博客，解决学习中的实际问题。
5. **逐步深入进阶**：掌握基本操作后，深入学习传感器校准、状态估计（如 EKF）、高阶功能（如避障、编队控制）。可参考 MIT OCW《Aircraft Stability and Control》课程²²了解飞行控制理论；阅读开源项目源码和相关论文（如 MDPI 综述²³）了解行业技术趋势。通过不断实践（硬件测试或高级仿真），逐步从多旋翼扩展到完整 eVTOL 架构。

航空电子基础资源

- **教材/参考书**：MIT 等高校公开课（如 OCW“Aircraft Stability and Control”²²）系统讲解飞行动力学与控制；FAA《飞行知识手册》等官方手册介绍飞行原理；国内全权著作《多旋翼飞行器设计与控制》深入讲解四旋翼建模和控制。MDPI 等学术综述论文（如²³）也提供了开源飞控的综合信息。
- **在线视频/课程**：学堂在线和 Coursera/edX 等平台上有无人机相关课程，例如学堂在线“无人机飞行控制”²¹介绍模拟飞行基础；Bilibili 上有国内外专家的 PX4、ROS、无人机设计教学视频；National UAV 飞行控制竞赛等组织也有分享的培训资料。
- **博客/社区**：CSDN、知乎等中文社区有大量飞控科普与教程（如“无人机飞控原理与构成”²⁰），可辅助快速入门。官方论坛（ArduPilot 论坛、PX4 Slack/GitHub Issues）和无线电控制飞行社群也是获取帮助的好渠道。Pap/Ardu/PX4 项目 Wiki 上也有详尽的架构介绍和案例教程。

综上，通过结合主流开源飞控项目的实践（PX4、ArduPilot、Paparazzi 等）与航空电子基础知识学习，新手开发者可以系统地进入 eVTOL 飞行控制领域，逐步从基础姿态控制过渡到复杂的自动飞行任务。

参考资料：PX4 官方文档 ⁵ ⁶、ArduPilot 官方说明 ²⁴ ²、Paparazzi 官方文档 ⁸ ⁹、MDPI 综述 ²³ ⁴、相关博客与公开课程 ²⁰ ²¹ 等。

¹ ² ⁴ ⁷ ⁹ ¹⁰ ¹¹ ¹² ¹³ ¹⁴ ¹⁶ ¹⁷ ¹⁸ ²³ A Survey of Open-Source UAV Autopilots

<https://www.mdpi.com/2079-9292/13/23/4785>

³ Welcome to the ArduPilot Development Site — Dev documentation

<https://ardupilot.org/dev/index.html>

⁵ ⁶ ROS学习笔记之——PX4开发初入门-CSDN博客

<https://blog.csdn.net/gwplovekimi/article/details/118569078>

⁸ Community — PaparazziUAV _devel documentation

<https://paparazzi-uav.readthedocs.io/en/latest/>

¹⁵ Using SITL with Gazebo — Dev documentation

<https://ardupilot.org/dev/docs/sitl-with-gazebo.html>

¹⁹ ²⁰ 无人机飞控基础知识介绍，无人机飞控基本原理及构成_csdn 无人机-CSDN博客

<https://blog.csdn.net/dong2010hong/article/details/136036853>

²¹ Free Course: 无人机飞行控制 from China Fire and Rescue Institute | Class Central

<https://www.classcentral.com/course/xuetangx-375000>

²² Aircraft Stability and Control | Aeronautics and Astronautics | MIT OpenCourseWare

<https://ocw.mit.edu/courses/16-333-aircraft-stability-and-control-fall-2004/>

²⁴ ArduPilot - Versatile, Trusted, Open

<https://ardupilot.org/>