



多旋翼飞行器设计与控制 实践

第二讲 实验平台配置

戴训华 副教授
中南大学 计算机学院

dai.xh@csu.edu.cn

https://faculty.csu.edu.cn/daixunhua/zh_CN



大纲

1. 总体介绍
2. 软件包安装方法
3. 硬件平台配置
4. 小结

本课程所需教具购买以及高级功能解锁，可以访问如下淘宝店链接，或淘宝App扫描右侧二维码

<https://shop212206553.taobao.com/>



SX200飞思



基础版飞控套装



高级版飞控套装

注意：目前RflySim高级版（RflySimAdvFree）已经免费发布了，能够覆盖本课程所有内容实现，如果需要更高级的功能，请访问<https://doc.rflysim.com>



总体介绍

本课程提供的实验平台总体可以分成两个部分：硬件平台和软件平台。本讲将依次介绍各个部分的基本组成，以及详细的平台配置步骤。

注意：本讲内容主要针对独立学习者或者实验课程老师，需要完成代码生成环境的部署工作并准备好实际飞行实验的平台。如果已经有配置好的实验平台，读者也可以跳过本讲的内容，直接在实验平台上按步骤完成后续实验课程。



总体介绍

□ 硬件平台

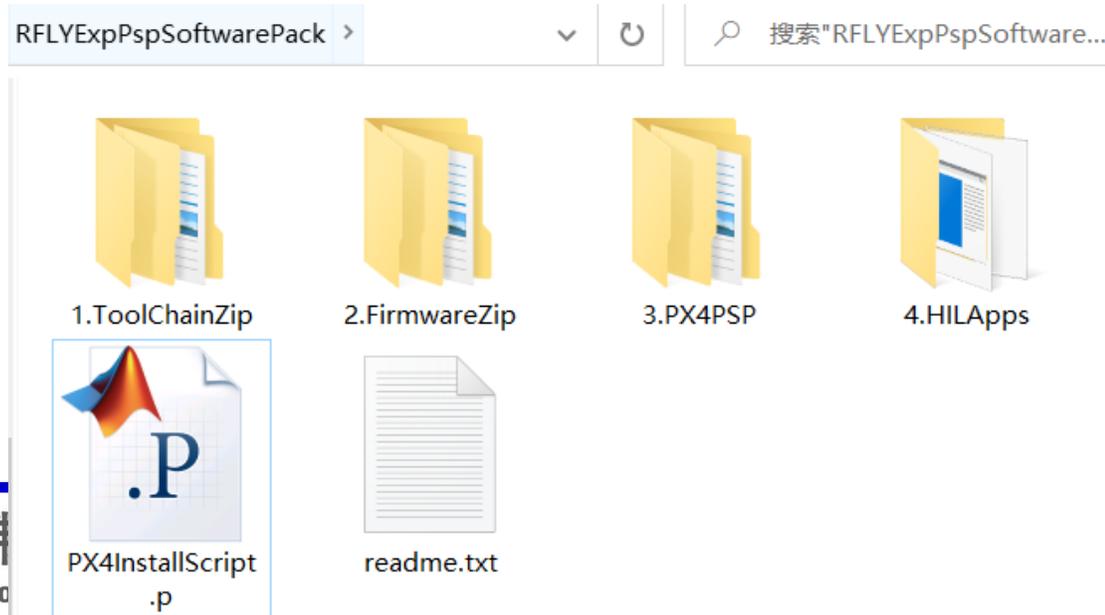
软硬件平台如右图，其中计算机配置要求：

- Windows 7~10系统（推荐Windows 10），64位系统
- 8G及以上内存
- 英特尔I5及以上处理器
- 独立显卡，2G及以上显存
- 硬盘剩余空间大于30G（推荐固态硬盘）
- USB Type A接口大于等于2个（可使用外部扩展）
- 显示器分辨率大于等于1080P (1920*1080)

硬件平台：



软件安装包：





总体介绍

□ 硬件平台

由于控制算法最终将会在真机上进行部署与飞行实验，一套可完成基本飞行任务的多旋翼硬件平台是必不可少的。如右图所示，本文选用的多旋翼硬件平台主要由5个部分组成：

1) 地面计算机：主要承担两部分工作

- 飞行前的控制算法开发与仿真验证（开发与仿真计算机功能）；
- 实际飞行实验过程中用于地面发送控制指令以及实时显示飞行状态（地面站功能）。

机架系统



动力系统



遥控器系统



自驾仪硬件系统



地面计算机



总体介绍

□ 硬件平台

2) 自驾仪系统：作为控制软件的运行平台，具有强大的计算性能与丰富的传感器，来获取飞行状态并计算输出动力系统的控制指令，实现多旋翼的飞行控制。本书选用目前应用广泛的Pixhawk 系列开源自驾仪系统。其中，Pixhawk 是一个独立的开源硬件项目，致力于为教育、爱好和开发者提供易用、高品质且低成本的自驾仪硬件。针对不同的飞行任务、性能需求和成本需求，Pixhawk提供了一系列的自驾仪硬件产品，极大地推动了多旋翼无人机行业的发展。

机架系统



动力系统



遥控器系统



自驾仪硬件系统



地面计算机



总体介绍

□ 硬件平台

3) 遥控器系统：包含遥控器、接收机、充电器等，用于将地面控制人员（飞控手）的操控指令发给自驾仪以实现多旋翼的飞行操纵。

4) 动力系统：包含电池、螺旋桨、电子调速器（电调）和电机，用于接收自驾仪发送的PWM控制指令，通过螺旋桨旋转产生拉力与力矩，控制多旋翼的运动。

5) 机架系统：包含机身、机臂、起落架等，用于承载负载、动力系统和自驾仪，需要优良的气动和结构强度来保证飞行任务可靠顺利的完成。

机架系统



动力系统



遥控器系统



自驾仪硬件系统



地面计算机



总体介绍

□ 软件平台

本平台支持MATLAB 2017b以上所有版本，

目前最高版本为MATLAB 2021a

推荐安装版本为： MATLAB 2017b



- 本书不提供MATLAB 的安装包与安装流程，请读者自行购买并安装上述工具箱。
- 安装时推荐勾选所有工具箱（全功能安装）。如果条件受限只能部分安装，本实验必须的工具箱包括：

MATLAB/Simulink
Control System Toolbox
Curve Fitting Toolbox
Aerospace Blockset
Aerospace Toolbox
MATLAB Coder
Simulink Coder
Stateflow



总体介绍

□ 软件平台

本实验平台依赖众多软件于工具来实现控制器设计、代码自动生成、自驾仪代码编译、硬件在环仿真等功能。本书附带的仿真软件包内有一键安装脚本，只需运行安装命令，即可完成所有软件的安装与配置。仿真软件包中包含：

1) **Pixhawk Support Package (PSP) 工具箱**：
Mathworks公司官方为Pixhawk自驾仪推出一个工具箱，用于将Simulink中设计的控制算法生成C代码并编译上传到Pixhawk自驾仪硬件。

控制器设计与仿真



代码自动生成与固件编译



代码阅读与修改



硬件在环仿真



室内外飞行实验





总体介绍

□ 软件平台

2) **FlightGear飞行模拟器**：一款非常受欢迎的开源飞行模拟器软件，可以通过UDP接收Simulink发送的飞行状态，方便地观测Simulink仿真时飞机的飞行状态。

3) **PX4 Firmware源代码**：PX4 是一款开源飞行控制软件系统，它运行在Pixhawk系列自驾仪硬件平台上，构成了Pixhawk PX4自驾仪软硬件平台，是目前世界范围内广泛应用的开源无人机自驾仪。

控制器设计与仿真



代码自动生成与固件编译



代码阅读与修改



硬件在环仿真



室内外飞行实验





总体介绍

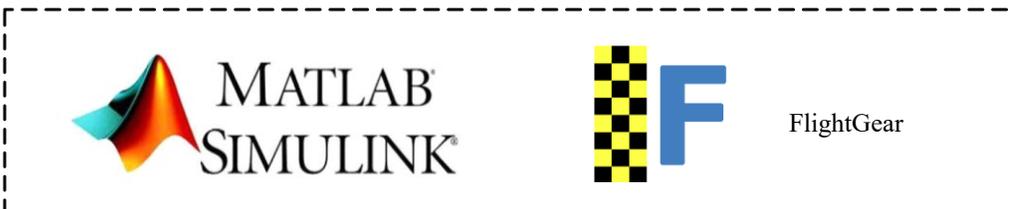
□ 软件平台

4) **PX4 Toolchain**编译环境：用于将PX4原生代码和PSP工具箱生成的控制器代码编译成.px4格式的固件，然后上传并烧录到Pixhawk自驾仪硬件中（类似于重装系统的过程），重新启动后就会自动运行PSP工具箱生成的控制算法。

5) **Eclipse IDE for C/C++**集成开发环境：用于阅读与修改PX4源代码，是一款小巧的C/C++集成开发环境，功能类似于微软的Visual Studio。

注意：目前RflySim高级版（RflySimAdvFree）中已经使用VS Code来替换Eclipse作为代码阅读工具，Eclipse不再在安装包中提供。

控制器设计与仿真



代码自动生成与固件编译



代码阅读与修改



硬件在环仿真



室内外飞行实验



可靠飞行控制研究组

BUAA Reliable Flight Control Group



总体介绍

□ 软件平台

6) QGroundControl (QGC) 地面站：用于在多旋翼起飞前对Pixhawk自驾仪进行传感器校准和参数调整等初始化工作，以及在飞机飞行过程中通过无线数传接收飞行状态并实时发送控制指令。

7) CopterSim 实时运动仿真软件：北航可靠飞行控制研究组开发的针对Pixhawk PX4自驾仪平台的硬件在环仿真软件，可以在软件中配置多旋翼的模型，通过USB串口与Pixhawk自驾仪连接来实现硬件在环仿真，达到室内模拟室外飞行测试的效果。

控制器设计与仿真



代码自动生成与固件编译



代码阅读与修改



硬件在环仿真



室内外飞行实验





总体介绍

□ 软件平台

8) 3DDisplay/RflySim3D三维可视化视景软件：北航可靠飞行控制研究组开发的多旋翼三维显示软件，通过UDP接收CopterSim的飞行数据来实时显示多旋翼的姿态与位置。CopterSim仿真程序与3DDisplay显示软件两者共同构成了硬件在环仿真平台，两者分布式独立运行机制保证了多机多视角的仿真成为可能。

9) 此外，我们还基于UE4/UE5开发了更逼真的3D场景引擎RflySim3D，可用于后期的图像处理需求。

注意：目前RflySim高级版（RflySimAdvFree）中已经使用RflySim3D来替换3DDisplay作为三维实时观察工具，3DDisplay不再在安装包中提供。

控制器设计与仿真



代码自动生成与固件编译



代码阅读与修改



硬件在环仿真



室内外飞行实验





软件包安装方法

□ 安装步骤

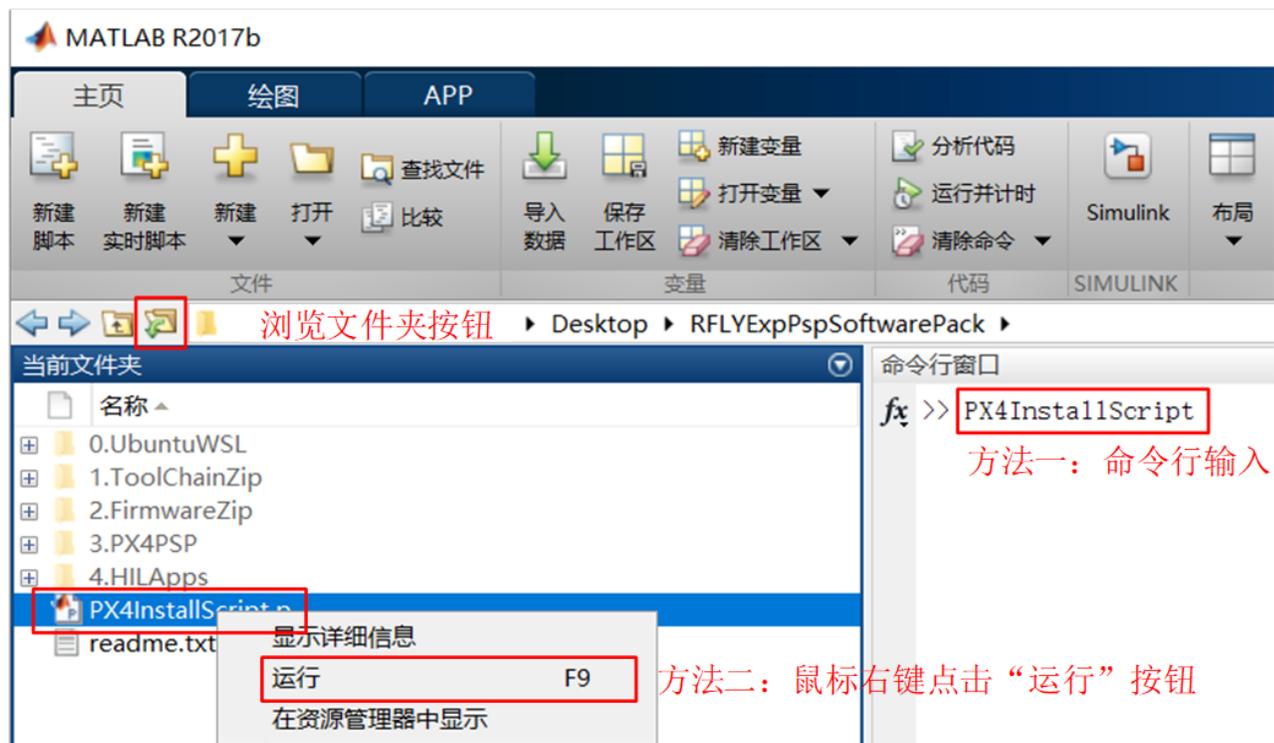
1) 官网 (<https://rflysim.com/download>) 获取并下载到虚拟光驱或者解压拷贝到本机合适位置。

2) 打开MATLAB，点击右图所示的“浏览文件夹”按钮，将当前路径定位并进入到上一步得到的“RFLYExpPspSoftwarePack”目录。

3) 选中“PX4InstallScript.p”文件，点击鼠标右键，在弹出右键菜单中点“运行”选项。
注：另一种方法是在“命令行窗口”中输入命令“PX4InstallScript”，并按下回车键。

注意：目前下载的RflySim基础免费版只提供PX4 1.7和1.8固件和Msys2编译器，已经能够确保本课程所有内容实现，如果需要更高级的功能，请访问https://rflysim.com/docs/#/4_Pro/Advanced

“RFLYExpPspSoftwarePack.iso”安装包镜像，





软件包安装方法

□ 安装步骤

4) 在弹出的配置窗口中，根据实际软硬件情况选择合适配置（本课程推荐使用默认配置，对应Pixhawk 1（2M闪存版，px4fmu-v3_default编译命令）自驾仪硬件，PX-1.7.3版本PX4固件，MSys2编译器，安装目录为C盘，占用6G左右空间），点击右下角的“确定”按钮。

5) 耐心等待软件包安装部署完成，总共需要大约30分钟

注意：杀毒软件可能会阻止本脚本生成桌面快捷方式。如果脚本提示快捷方式生成失败，请关闭杀毒软件(Win10系统还需要在设置页面暂时关闭“实时保护”开关)，并手动点击安装目录下的GenerateShortcutCMD.bat脚本，自动生成所有软件快捷方式。

注意：如果想更改固件编译版本或还原编译环境，可以再次运行“PX4InstallScript”命令，更改对应选项即可。

工具箱一键安装脚本

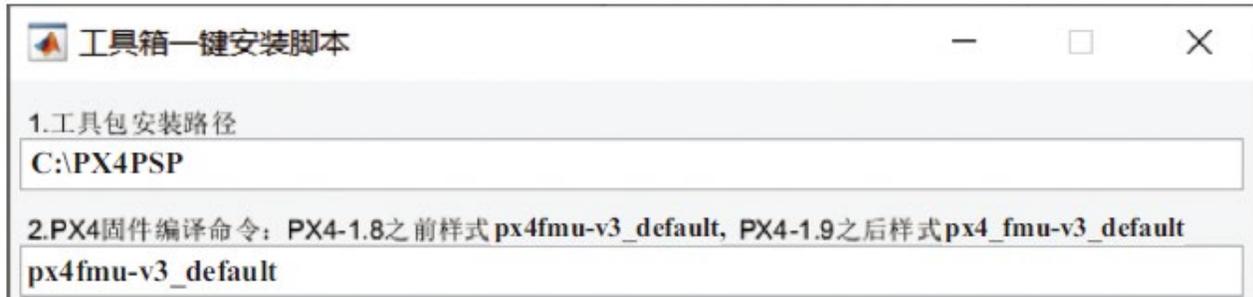
- 1.工具包安装路径
C:\PX4PSP
- 2.PX4固件编译命令：PX4-1.8之前样式px4fmu-v3_default, PX4-1.9之后样式px4_fmu-v3_default
px4fmu-v3_default
- 3.PX4固件版本（1: PX4-1.7.3, 2: PX4-1.8.2, 3: PX4-1.9.2, 4: PX4-1.10.0）
1
- 4.PX4固件编译器（1: Win10WSL[通用], 2: Msys2[通用版本≤PX4-1.8], 3: Cygwin[适用≥PX4-1.8]）
2
- 5.是否重新安装PSP工具箱
 是
- 6.是否重新安装其他依赖程序包（FlightGear、QGC地面站、硬件在环仿真软件等，约5分钟）
 是
- 7.是否重新配置固件编译器编译环境（约5分钟）
 是
- 8.是否重新部署PX4固件代码（大约5分钟）
 是
- 9.是否预先用选定命令编译固件（大约5分钟）
 是
- 10.是否屏蔽PX4自身控制器输出
 是

确定 取消



软件包安装方法

□ 进阶设置



1) 工具包安装路径。本平台的所有依赖文件都会安装在本路径下，大约需要6G的空间。默认安装路径是“C:\PX4PSP”，如果C盘空间不够可以选择其他盘符下的路径。注意：路径名称必须正确，且只能用纯英文的路径，否则会导致编译失败。

2) PX4固件编译命令。默认的编译命令为“px4fmu-v3_default”，在PSP生成控制器代码后，会自动调用编译器将其编译为“px4fmu-v3_default.px4”格式固件文件，然后将该“.px4”文件上传并烧录到支持的硬件上，就可以实现算法的部署。不同的编译命令的区别主要在于驱动加载和部分功能模块的不同。下图展示了部分Pixhawk系列的自驾仪硬件产品，其中“px4fmu-v3_default”可用于Pixhawk 1 (2M闪存版，电路版本2.4.6及以上)，mRo 和Cube (Pixhawk 2)两款热门产品；而常用的“px4fmu-v2_default”支持最知名的Pixhawk 1自驾仪。当然，PX4还支持其他的一些硬件（例如，Intel Aero、Crazy等），具体的编译命令如下页：

注：第一次安装完成后，除了重新运行本安装脚本，另一种针对不同的Pixhawk硬件板子想更换不同的编译命令（例如换成px4-fmu-v5_default）的方法，只需要在MATLAB中输入命令：

PX4CMD('px4-fmu-v5_default') 或者使用命令：PX4CMD px4-fmu-v5_default



软件包安装方法

2.PX4固件编译命令: PX4-1.8之前样式 px4fmv-v3_default, PX4-1.9之后样式 px4_fm-v3_default
px4fmv-v3_default

□ 进阶设置

- Pixhawk 1: px4fmv-v2_default
- **Pixhawk 1 (2M flash): px4fmv-v3_default**
- Pixhawk 4: px4fmv-v5_default
- Pixracer: px4fmv-v4_default
- Pixhawk 3 Pro: px4fmv-v4pro_default
- Pixhawk Mini: px4fmv-v3_default
- Pixhawk 2: px4fmv-v3_default
- mRo Pixhawk: px4fmv-v3_default
- HKPilot32: px4fmv-v2_default
- Pixfalcon: px4fmv-v2_default
- Dropix: px4fmv-v2_default
- MindPX/MindRacer: mindpx-v2_default
- mRo X-2.1: auav-x21_default
- Crazyflie 2.0: crazyflie_default
- Intel® Aero Ready to Fly Drone: aerofc-v1_default



Pixhawk 1 (FMUv2)
2M flash Version (FMUv3)



mRo Pixhawk (FMUv3)



Cube (Pixhawk 2, FMUv3)



Pixhawk 3 Pro (FMUv4)



Pixhawk 4 (FMUv5)



Pixhawk 4 Mini (FMUv5)



软件包安装方法

2. PX4固件编译命令: PX4-1.8之前样式 `px4fmv-v3_default`, PX4-1.9之后样式 `px4_fm-v3_default`
`px4fmv-v3_default`

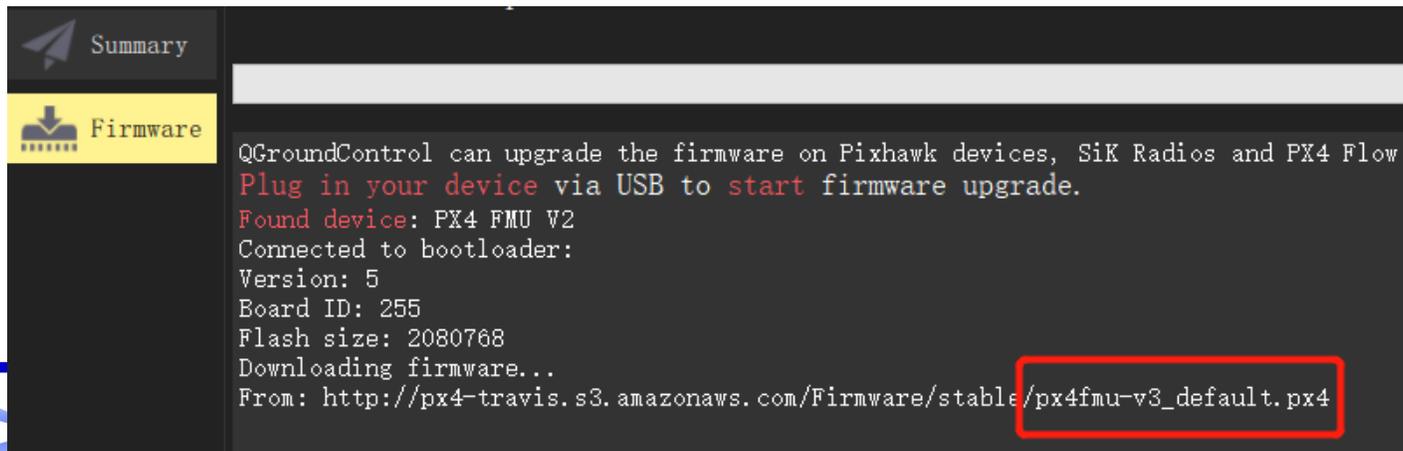
□ 进阶设置

判断自己Pixhawk硬件对应的编译命令的方法:

1) 打开QGroundControl地面站程序, 进入到“设置”(齿轮图标) - “Firmware”标签页;

2) 用USB线插上Pixhawk, 可以看到右上图界面, 会显示闪存大小等信息, 直接点击“OK”;

3) 此时QGroundControl会自动从云端下载匹配的.px4固件, 从下载链接可以判断编译命令。例如右图为`px4fmv-v3_default`





软件包安装方法

□ 进阶设置

3.PX4固件版本 (1: PX4-1.7.3, 2: PX4-1.8.2, 3: PX4-1.9.2, 4: PX4-1.10.0)

1

4.PX4固件编译器 (1: Win10WSL[通用], 2: Msys2[适用版本≤PX4-1.8], 3: Cygwin[适用≥PX4-1.8])

2

3) PX4固件版本。PX4源代码每年都会进行更新，目前最新的固件版本为1.11。随着固件版本的升级，功能会逐渐增加，支持的新产品也越多，但是对旧的一些自驾仪硬件的兼容就会变差。本实验课程推荐使用Pixhawk 1 (2M闪存版) 自驾仪，对应的编译指令为“px4fmu-v3_default”，选用的固件版本PX4-1.7.3。

4) PX4固件编译器。由于PX4源代码的编译依赖于Linux编译环境和相关组件，本平台提供了三套编译环境来实现Windows平台下对Linux编译环境的模拟，它们分别是：基于Windows Subsystem for Linux (WSL) 的编译环境Win10WSL编译器、基于Msys2的Msys2Toolchain编译环境和基于Cygwin的CygwinToolchain编译器。注意，如果需要编译≥PX4-1.8版本以上固件，请选择CygwinToolchain编译器；编译≤PX4-1.8版本的固件，请选择Msys2Toolchain编译器。基于Msys2或Cygwin的本地编译器，支持Windows 7~10平台，而且部署方便，但是编译效率较低。对于Windows 10 1809及以上的系统版本，可以选择安装Win10WSL编译器，这种方式可以大大加快编译速度，而且兼容所有版本的PX4飞控固件。



软件包安装方法

□ 进阶设置

示例1: 如果使用的是Pixhawk 1 (2M flash) 的飞控硬件(对应固件为px4fmu-v3), 推荐使用右上图所示软件安装配置, 和右下图所示硬件连接配置。

- 使用书本推荐的px4fmu-v3_default编译命令
- 使用书本推荐的PX4 1.7.3版本固件
- Pixhawk 1上自带LED灯, 不需要外接模块, 只需按右图连接遥控器接收机。注意: Pixhawk 2/3/4开始都不自带LED等模块, 需要购买外接LED模块
- 使用书本推荐的Msys2编译器

工具箱一键安装脚本

1.工具包安装路径

C:\PX4PSP

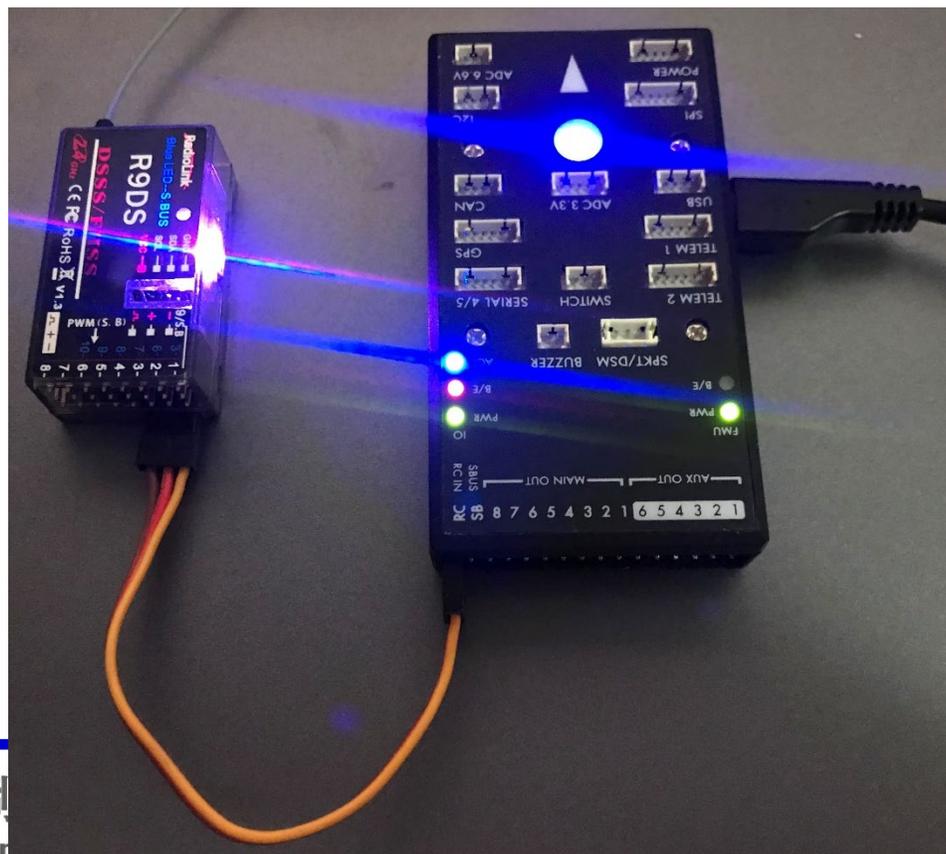
2.PX4固件编译命令: PX4-1.8之前样式px4fmu-v3_default, PX4-1.9之后样式px4_fmuv3_default
px4fmu-v3_default

3.PX4固件版本 (1: PX4-1.7.3, 2: PX4-1.8.2, 3: PX4-1.9.2, 4: PX4-1.10.2)

1

4.PX4固件编译器 (1: Win10WSL[通用], 2: Msys2[适用版本≤PX4-1.8], 3: Cygwin[适用≥PX4-1.8])

2





软件包安装方法

□ 进阶设置

示例2：如果使用的是Pixhawk 4飞控硬件(对应固件为px4fmu-v5)，为获取最佳实验效果，推荐使用右上图所示软件安装配置，和右下图所示硬件连接配置。

- 使用PX4 1.8.2及以上版本固件（已知PX4 1.7.3固件无法识别S.BUS接收机，你需要使用PPM模块进行转接来获取遥控器信号）
- 使用集成LED灯的GPS模块（插在GPS Module口）来观察灯光效果，使用JST GH转接线连接接收机（插在DSM/SBUS RC口）
- 使用px4fmu-v5_default编译命令

注：有的GPS模块使用新的LED芯片，需要最新PX4固件才能点亮，因此Pixhawk4推荐下载高级版平台，并使用PX4 1.12版本固件来进行测试，以保证兼容性。

工具箱一键安装脚本

1.工具包安装路径

C:\PX4PSP

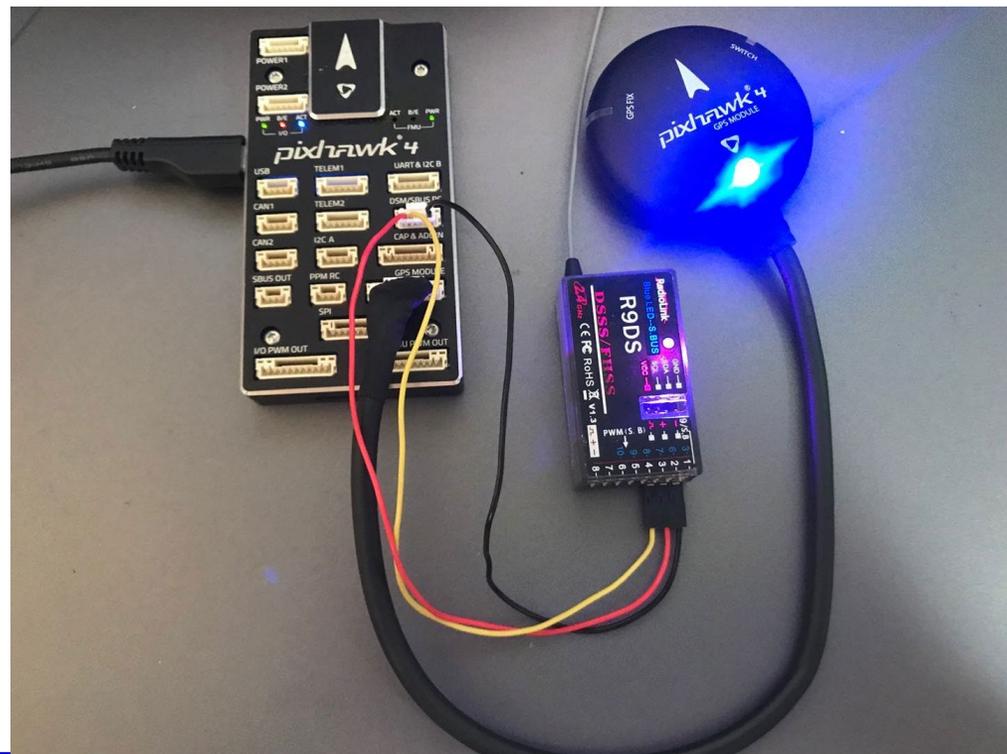
2.PX4固件编译命令：PX4-1.8之前样式px4fmu-v3_default，PX4-1.9之后样式px4_fmuv3_default
px4fmu-v5_default

3.PX4固件版本（1：PX4-1.7.3，2：PX4-1.8.2，4：PX4-1.10.2，5：PX4-1.11.3）

2

4.PX4固件编译器（1：Win10WSL[通用]，2：Msys2[适用版本≤PX4-1.8]，3：Cygwin[适用≥PX4-1.8]）

2



可靠飞行控制研究组

BUAA Reliable Flight Control Group



软件包安装方法

□ 进阶设置

5. 是否重新安装PSP工具箱

是

6. 是否重新安装其他依赖程序包（FlightGear、QGC地面站、硬件在环仿真软件等，约5分钟）

是

7. 是否重新配置固件编译器编译环境（约5分钟）

是

5) 是否全新安装PSP工具箱。如果该选项设置为“是”，会将PSP工具箱安装在本地MATLAB软件中。如果PSP工具箱已经安装过，则会对PSP工具箱进行全新安装。如果选择“否”，脚本对PSP工具箱不做任何更改（不会卸载掉安装的PSP工具箱或其他动作）。

6) 是否全新安装其他依赖程序包。如果该选项设置为“是”，会将FlightGear、QGC地面站、CopterSim、3DDisplay等软件部署在设定的安装路径上，并安装Pixhawk硬件的相关驱动程序，以及在桌面生成这些软件的快捷方式。如果安装路径上已经部署过相关依赖软件，选择“是”则会删除旧的安装包并进行全新重新安装。如果该选项设置为“否”则不做任何修改。

7) 是否全新配置固件编译器编译环境。如果该选项设置为“是”，会将选定的编译器（Win10WSL、CygwinToolchain或Msys2Toolchain）部署在设定的安装路径上，如果环境已经存在，则会清空旧的编译环境，进行还原与全新部署。反之，如果该选项设置为“否”则不会进行任何更改。



软件包安装方法

□ 进阶设置

8. 是否重新部署PX4固件代码（大约5分钟）

是

9. 是否预先用选定命令编译固件（大约5分钟）

是

10. 是否屏蔽PX4自身控制器输出

是

8) 是否全新部署PX4固件代码。如果该选项设置为“是”，会将选定的PX4 Firmware源代码部署在设定的安装路径上，如果固件存在，会删除旧的固件文件夹，并进行全新部署。如果该选项设置为“否”则不会进行任何更改。

9) 是否全新编译固件。如果该选项设置为“是”，会对部署固件进行预编译，这样可以大大节省后续代码生成与编译的时间，同时可以检测环境安装是否正常。如果该选项设置为“否”则不会进行任何更改。

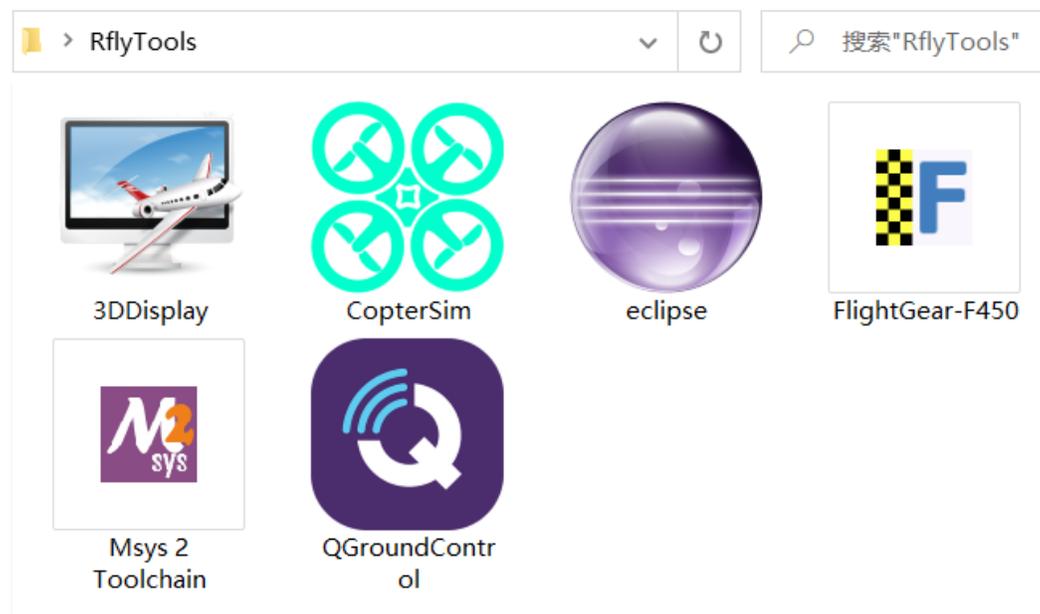
10) 是否屏蔽PX4自身控制器输出。如果该选项设置为“是”，会对Firmware中对电机的控制信号进行屏蔽，防止与生成代码发生冲突。在实际飞行实验前，这一项必须设置为“是”。如果选择“否”，则不会进行对固件输出进行屏蔽，可以用于测试PX4自带的控制算法。



软件包安装方法

□ 安装完成效果

1) 上述脚本安装完成后，可以在桌面上的RflyTools文件夹看到生成的如右图所示的核心工具的快捷方式。其中，根据用户配置选择的具体编译器类型，Msys2Toolchain、CygwinToolchain和Win10WSL三个编译器快捷方式只会出现一个。



注：如果安装中遇到任何问题，请先尝试卸载电脑杀毒软件（或者在任务管理器中保证彻底关闭），如果是Win10系统请关闭系统实时防护功能，再运行“4.HILApps\MSVCP_2019.07.20_X64.exe”进行修复，重启电脑后，再次运行本脚本。



软件包安装

□ 安装完成效果



3DDisplay



CopterSim



drivers



eclipse



examples



Firmware



FlightGear
2016.1.2



PX4Msys2Toolc
hain



Python27



QGrounContr
ol

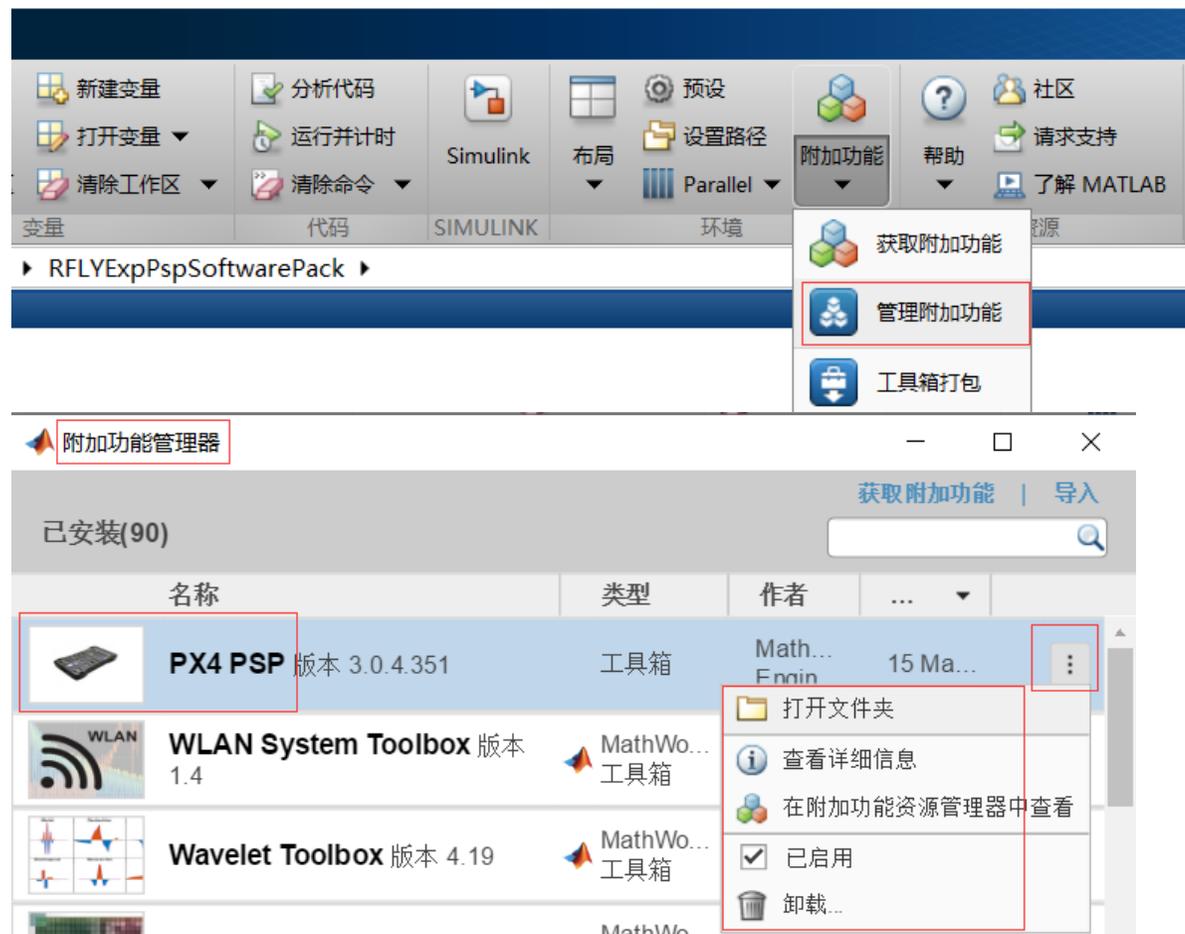
2) 如图所示，在安装路径（默认是“C:\PX4PSP”）会出现所有软件的存储文件夹。需要注意的是，本平台所有软件都是和系统自身软件完全绿色的（或称可携式软件，最大特点是和系统其他软件完全独立，移除后也不会将任何纪录留在本机计算机上）。也就是说，如果系统原来安装有QGrounControl或FlightGear等软件，本仿真平台的软件与之不会冲突，可以完全独立共存。“Firmware”文件夹中存储的是PX4的源代码；“examples”文件夹是PSP工具箱附带的Simulink例程；“drivers”文件夹存储着Pixhawk系列自驾仪的驱动程序；“Python27”文件夹存储着一个Python环境，用于实现PSP工具箱中的自动代码上传等功能。



软件包安装方法

□ 安装完成效果

3) 如右图所示，在MATLAB主界面的“附加功能”-“管理附加功能”页面，可以看到新安装的PSP工具箱图标。在该页面可以对PSP工具箱进行一些管理设置，例如禁用、卸载、查看安装目录等。需要注意的是，本工具箱只需安装一次即可给本机上所有R2017b及以上版本的MATLAB使用。

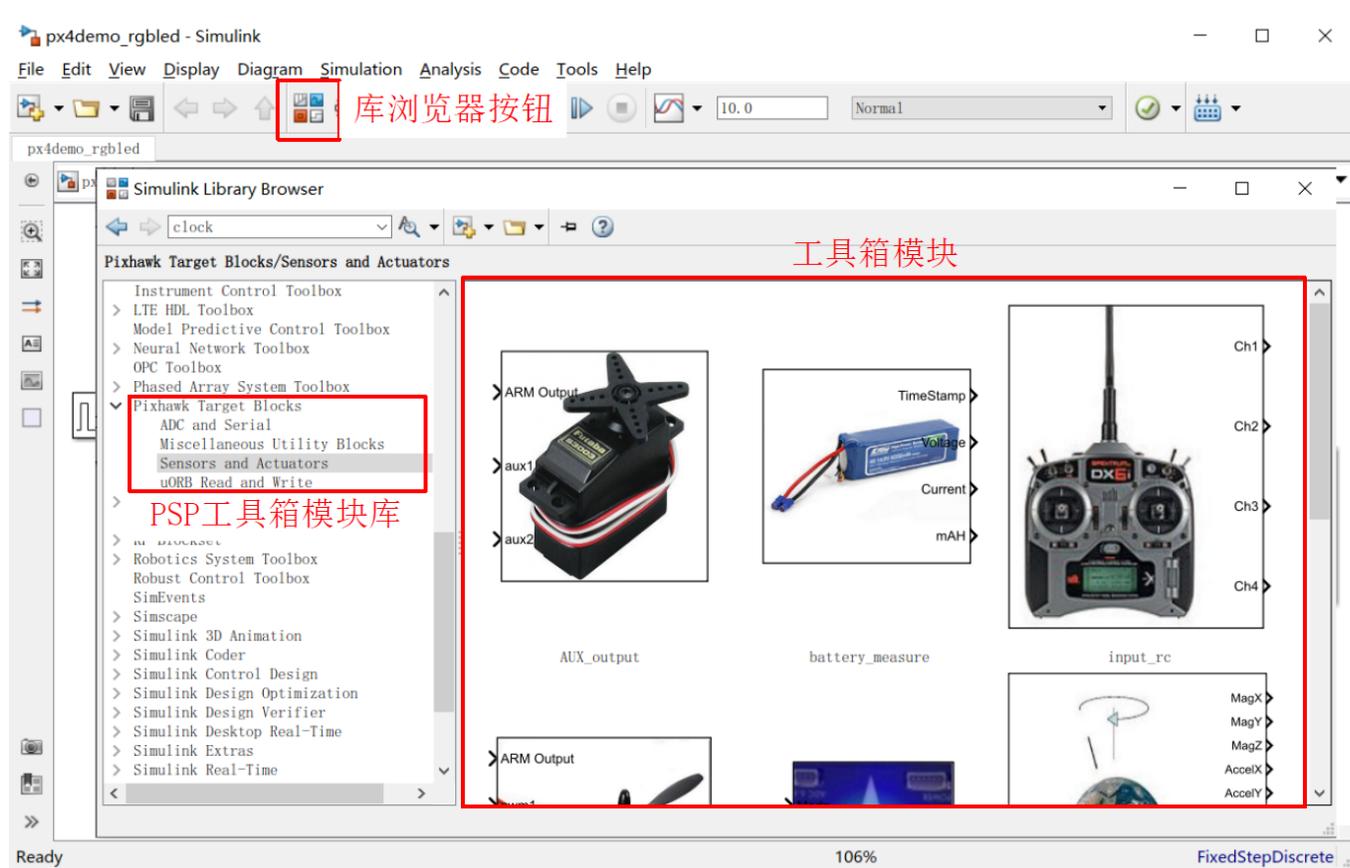




软件包安装方法

□ 安装完成效果

4) 如右图所示, 任意打开一个 Simulink 文件, 点击“库浏览器 (Simulink Library Browser)”按钮, 可以在其中找到PSP工具箱的“Pixhawk Target Blocks”模块库。



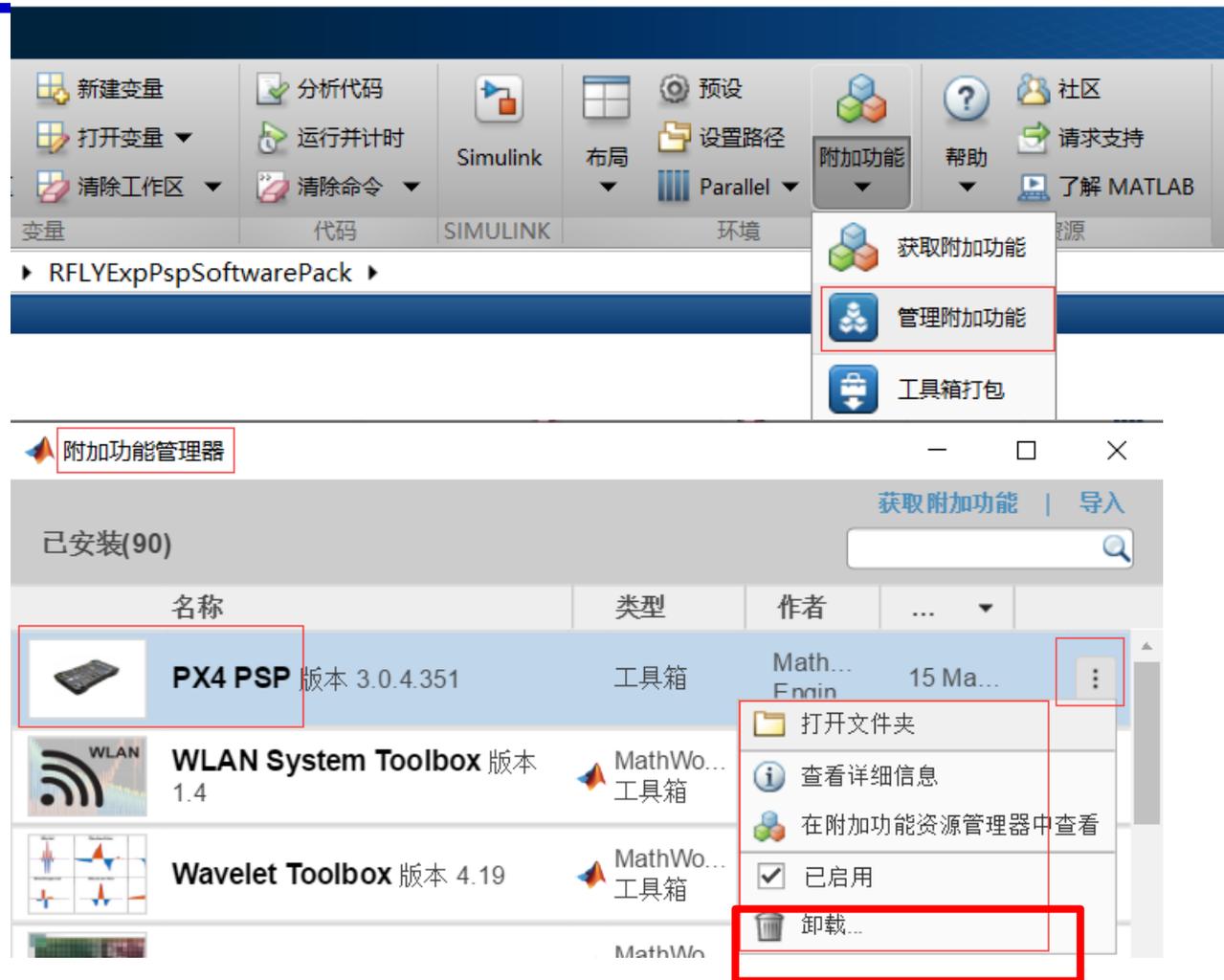


软件包安装方法

□ 安装完成效果

5) 如果想完全卸载本平台软件，只需要简单执行下列步骤：

- 删除桌面RflyTools内所示快捷方式；
- 删除安装目录（默认“C:\PX4PSP”）文件夹内的所有文件和子文件夹；
- 在MATLAB的“管理附加功能”项目中，点击卸载按钮，卸载PSP工具箱。（如果这里卸载失败，也可以关闭MATLAB后删除计算机内[文档]\MATLAB\Add-Ons\Toolboxes\PX4PSP文件夹来卸载，MATLAB 2021a开始需要使用此方法）
- 重启 MATLAB 并在命令窗口输入“edit pathdef.m”，查找并删除残余的PX4路径条目；
- 注意：[文档]\Ogre目录下存储着序列号等文件，建议保留。

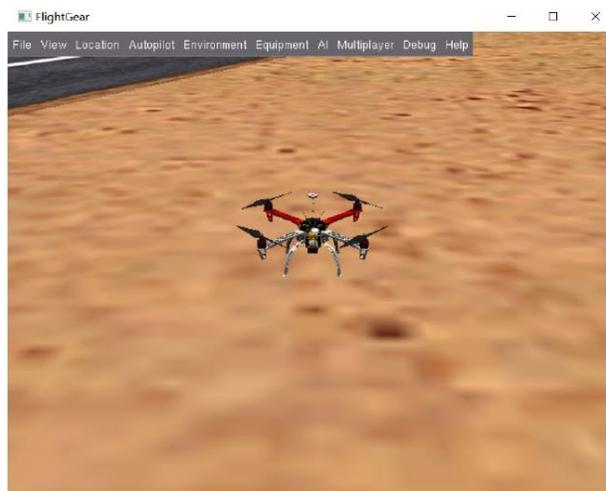




软件包安装方法

□ 基本软件介绍

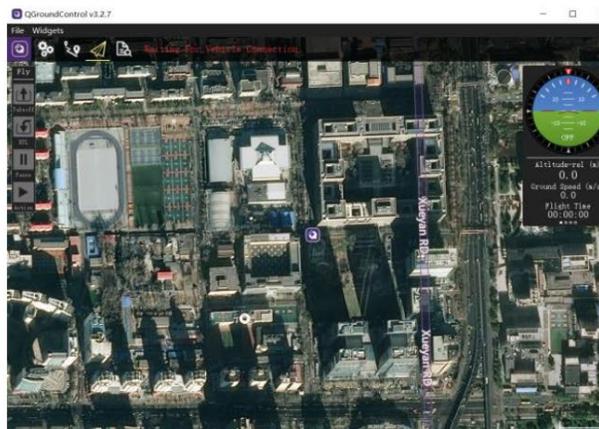
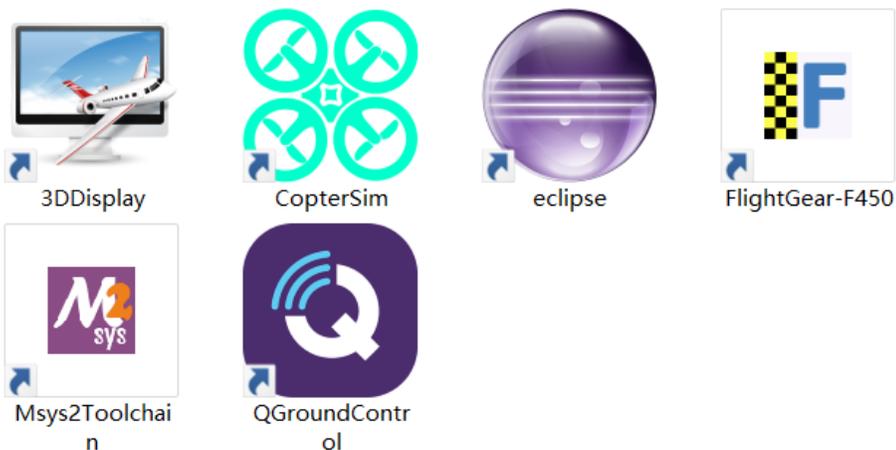
1) 依次双击的桌面快捷方式：“FlightGear-F450”、“CopterSim”、“QGroundControl”和“3DDisplay”，得到的软件界面如右图所示，逐一确认各个软件可以正常运行。



(a) FlightGear-F450



(b) CopterSim



(c) QGroundControl



(d) 3DDisplay

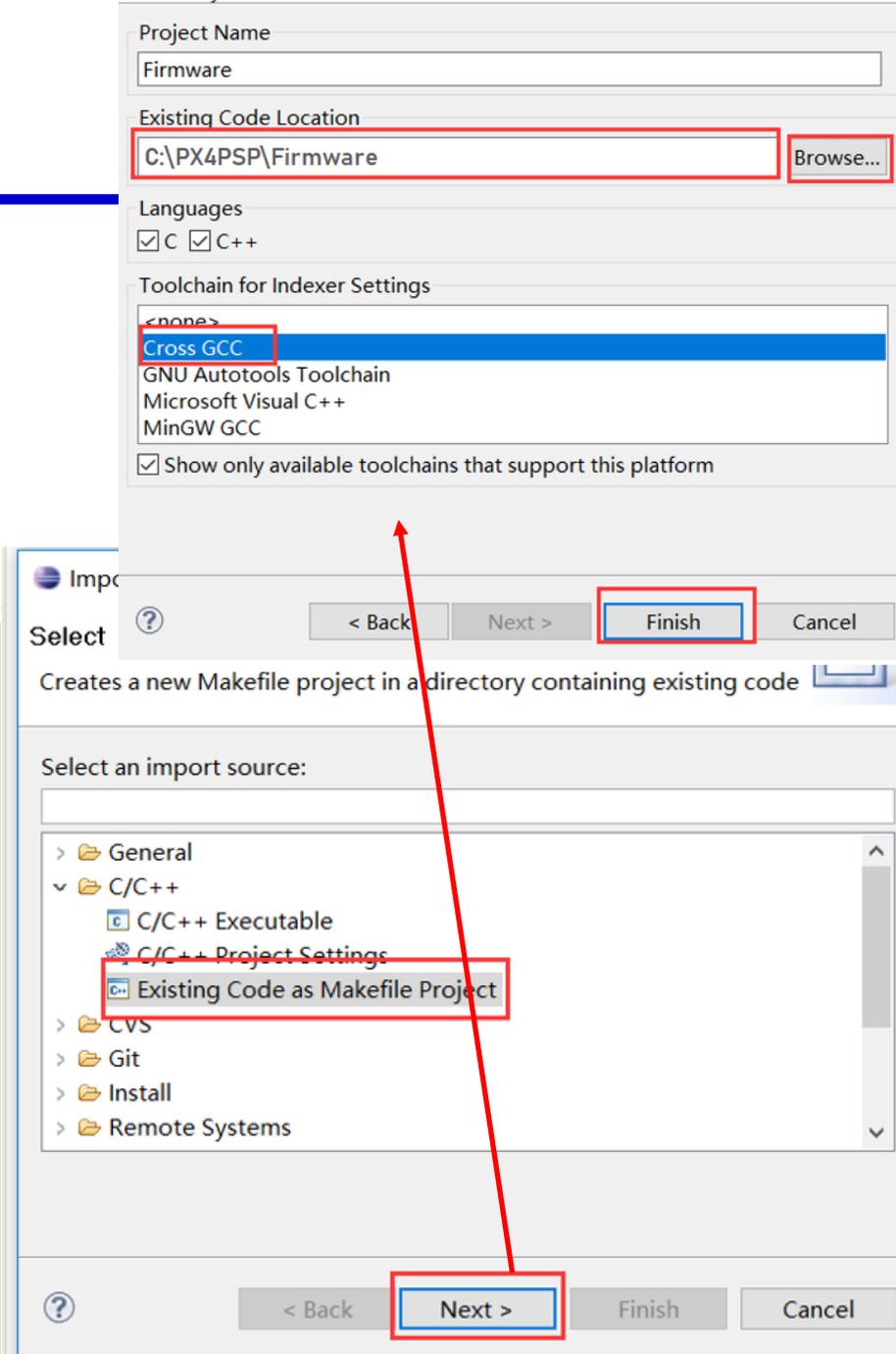
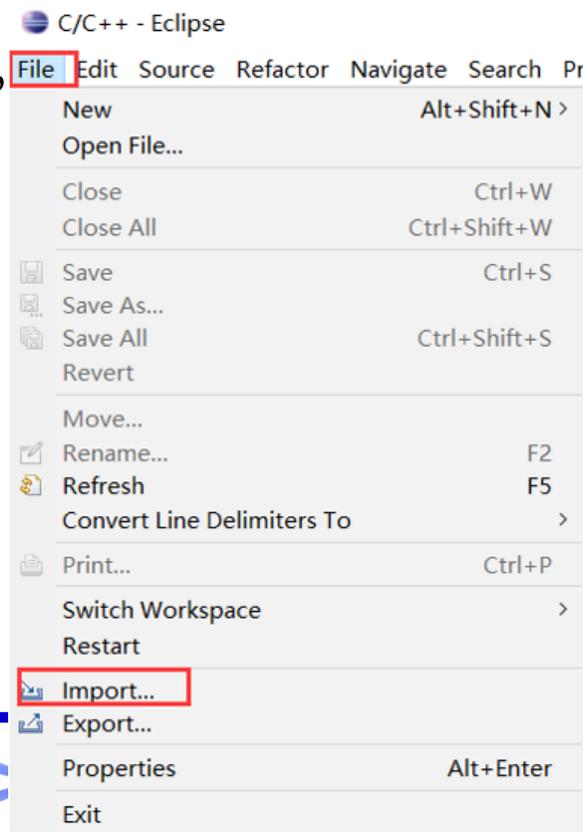


软件包安装方法

□ 基本软件介绍

2) 双击桌面快捷方式“Eclipse”，可以打开Eclipse软件。如右图所示，在Eclipse菜单栏上点击“File” - “import...” - “C/C++” - “Existing Code as Makefile Project” 点击下方“next”。在弹出新窗口的“Existing Code Location”栏目，点击“Browse”按钮浏览选到安装路径（默认是“C:\PX4PSP”）下的“Firmware”文件夹，再选择“Cross GCC”，点击“Finish”按钮。

注：Eclipse只用于阅读与编辑代码，不影响本平台其他任何功能。如果Eclipse无法访问或正常运行，可以换用VS Code等其他编辑器（例如，使用RflySim高级版可直接在Firmware文件夹，右键选择VS Code打开即可阅读代码）。



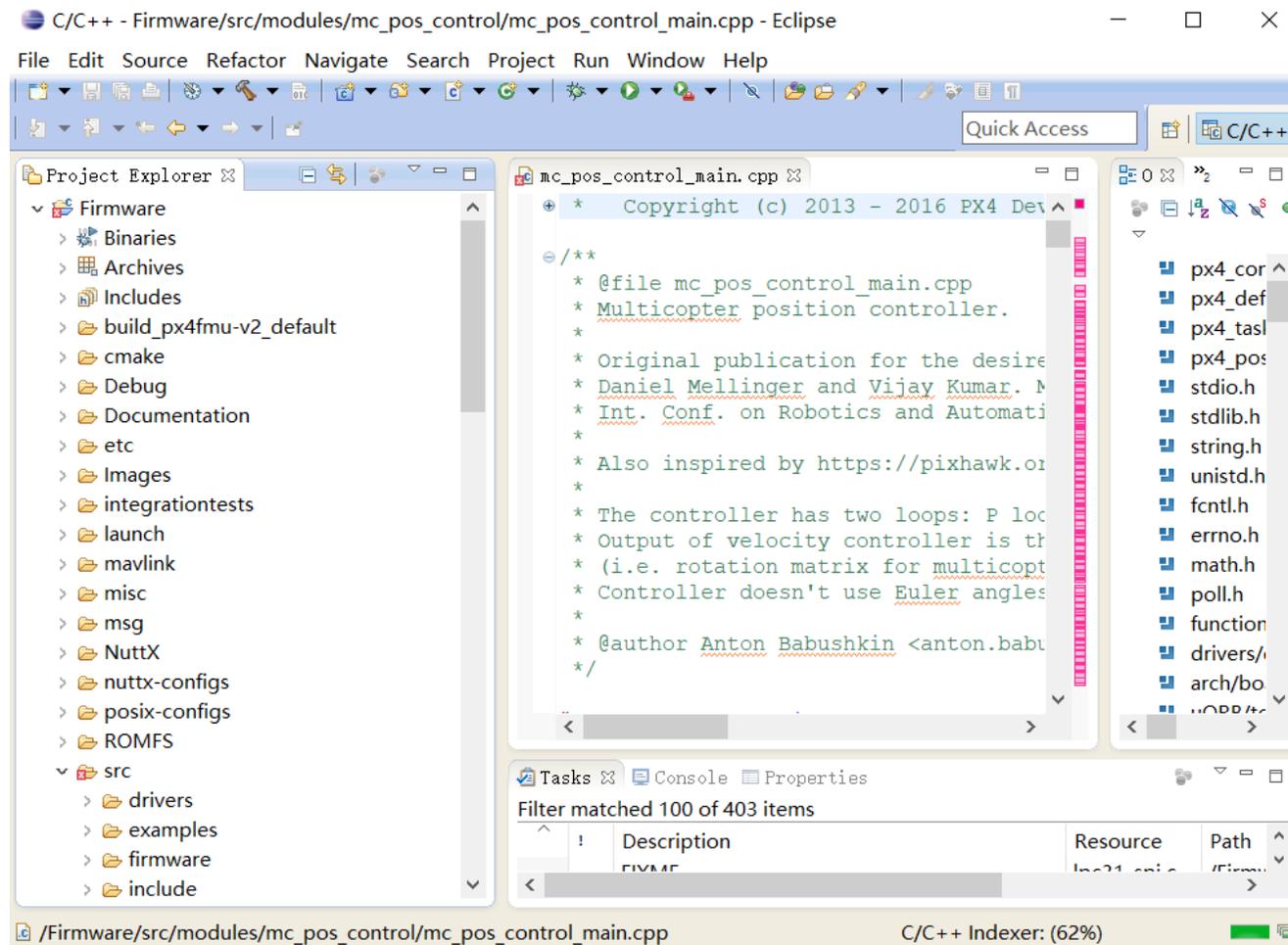


软件包安装方法

□ 基本软件介绍

3) 完成上述步骤后，如右图所示，在“Project Explorer”窗口可以看到“Firmware”固件的代码和结构，可以在其中阅读PX4代码，并尝试修改。也可以结合PX4的开发者文档网站<http://dev.px4.io/en/>，更清楚地了解PX4中算法的构架与实现原理，加深对实际飞行控制系统的理解。

注意：如果是第一次打开Eclipse，会有一个Welcome欢迎标签页，先手动关闭该标签页。





软件包安装方法

□ 基本软件介绍

```
/mnt/d/PX4PSP/Firmware
dream@dai dai MSYS /mnt/d/PX4PSP/Firmware
$ ls
cmake                eclipse.cproject      Makefile             ROMFS
CMakeLists.txt       eclipse.project       mavlink              src
CODE_OF_CONDUCT.md  Firmware.sublime-project  msg                  test
CONTRIBUTING.md    integrationtests     package.xml          test_data
CTestConfig.cmake   Jenkinsfile           platforms            Tools
Documentation        launch                posix-configs        README.md
dream                LICENSE

dream@dai dai MSYS /mnt/d/PX4PSP/Firmware
$ make clean

dream@dai dai MSYS /mnt/d/PX4PSP/Firmware
$ make px4fmu-v3_default
-- PX4 VERSION: v1.8.2
-- CONFIG: nuttx_px4fmu-v3_default
-- Build Type: MinSizeRel
CMake Deprecation Warning at /usr/share/cmake-3.13.2/Modules/CMakeForceCompiler.cmake:69 (message):
  The CMAKE_FORCE_C_COMPILER macro is deprecated.  Instead just set
  CMAKE_C_COMPILER and allow CMake to identify the compiler.
Call Stack (most recent call first):
```

4) 双击桌面的“Msys2Toolchain”（或根据安装选项选择“CygwinToolchain”、“Win10WSL”），可以弹出右上图所示的命令窗口界面。由于本编译环境本质上是一个Linux模拟系统，因此可以在其中输入基本的Linux指令（例如“ls”、“pwd”、“gcc --version”等），查看运行效果。因此对于不熟悉Linux操作的读者来说，本编译器软件也可以作为一个Linux的学习与练习工具。该编译器更重要的功能是编译PX4的源代码，生成px4固件文件。如右图所示，可以在命令行中输入“make clean”来清除旧的编译信息，以及输入“make px4fmu-v3_default”等指令来编译需要的px4格式固件文件（默认存储在“C:\PX4PSP\Firmware\build\px4fmu-v3_default\px4fmu-v3_default.px4”）。由于PSP在代码生成后会调用本编译环境，因此普通读者不需要掌握其使用方法。



硬件平台配置

□ 遥控器配置

- 本课程推荐的遥控器有两款，分别是乐迪AT9S遥控器和Futaba T14SG遥控器。购买遥控器时需要选择“左手油门（美国手，Mode2）”的遥控器，即左侧摇杆为油门杆，没有自动回中功能。
- 这两款遥控器的接收机都具备S.BUS输出功能，可以通过一根数据线将所有通道的PWM信号传输给自驾仪，使用较为简单。
- 乐迪AT9S价格较为便宜，适合室内课程使用；而Futaba T14SG的性能和可靠性更强，价格也非常昂贵，适合用于室外实验验证。
- 下文将详细描述两种遥控针对课程的设置方法。其余遥控器的设置也可以参考这两款遥控器的设置方法。



乐迪AT9S



Futaba T14SG

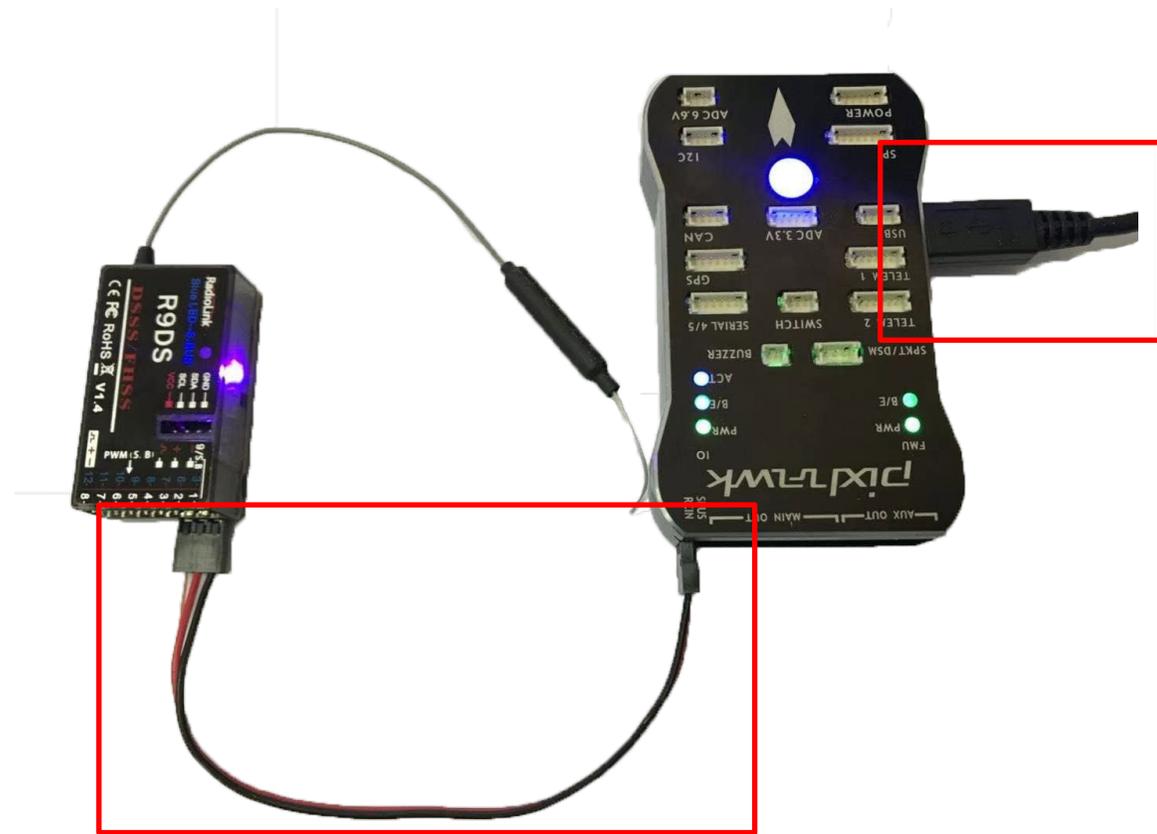


硬件平台配置

(1) 乐迪AT9S硬件组成

□ 遥控器配置 (1)乐迪AT9S遥控器

本实验首选的遥控器为乐迪AT9S遥控器和配套的R9DS接收机，必要的附件包括：电池（LiPo电池，3S，11.1V）和配套充电器，用于给遥控器供电；JR线（也可用杜邦线代替），用于连接接收机与Pixhawk自驾仪；MicroUSB数据线，用于连接Pixhawk自驾仪和计算机。





硬件平台配置

(2) 遥控器充电与电池安装

□ 遥控器配置 (1) 乐迪AT9S遥控器

1) 如右图左侧为电池和充电器的实物图，将充电器插在插座上，同时电池的四口充电头（平衡头）插在充电器右下侧的插口上，红色线在最左侧，即可开始充电。处于充电状态时，充电器的指示灯为红色，当电池电量充满时，指示灯变为绿色，此时充电完成，拔下电池放入电池后壳。注意：充电时将电池从遥控器中拔出，避免充电的同时使用遥控器。

2) 遥控器电池安装方式为：打开遥控器后侧下方电池槽（向下推即可），将电池供电头（红色接口，有红黑两条电线对应正极和负极）插在遥控器的电池槽左侧二口排插上，保证正极（红色电线）朝上。



注：充电器非必须，也可以使用USB线连接在遥控器的Micro-USB口进行充电。



硬件平台配置

(3) 接收机连线与设置

□ 遥控器配置 (1) 乐迪AT9S遥控器

1) 按右图连线，接收机右下侧排针通过JR线连接到飞控最左侧排针（注意线序，接收机LED灯暗红色说明线接反了），将USB与电脑USB口连接，给接收机供电。

2) 遥控器重新配对（默认情况已经连接完毕，只有连接出现问题时才需要重新配对）。打开遥控器电源，用笔尖长按接收机右侧面的按键超过一秒，此时LED灯闪烁，指示寻找距离最近的遥控器（此时应该将其他遥控关闭），并开始对码。LED灯闪烁7~8次后变为常亮，说明对码完毕，遥控器与接收机建立连接。

3) S.BUS信号模式选择。S.BUS模式使得可以通过一根JR线完成所有通道PWM信号的传输，从而建立接收机与飞控的连接。如果LED灯为蓝白色，说明此时属于S.BUS模式，不需要进行设置。如果LED灯为红色，则需要短按接收机右侧面按键两次（1秒内），LED灯变为蓝白色说明S.BUS模式切换完毕。





硬件平台配置

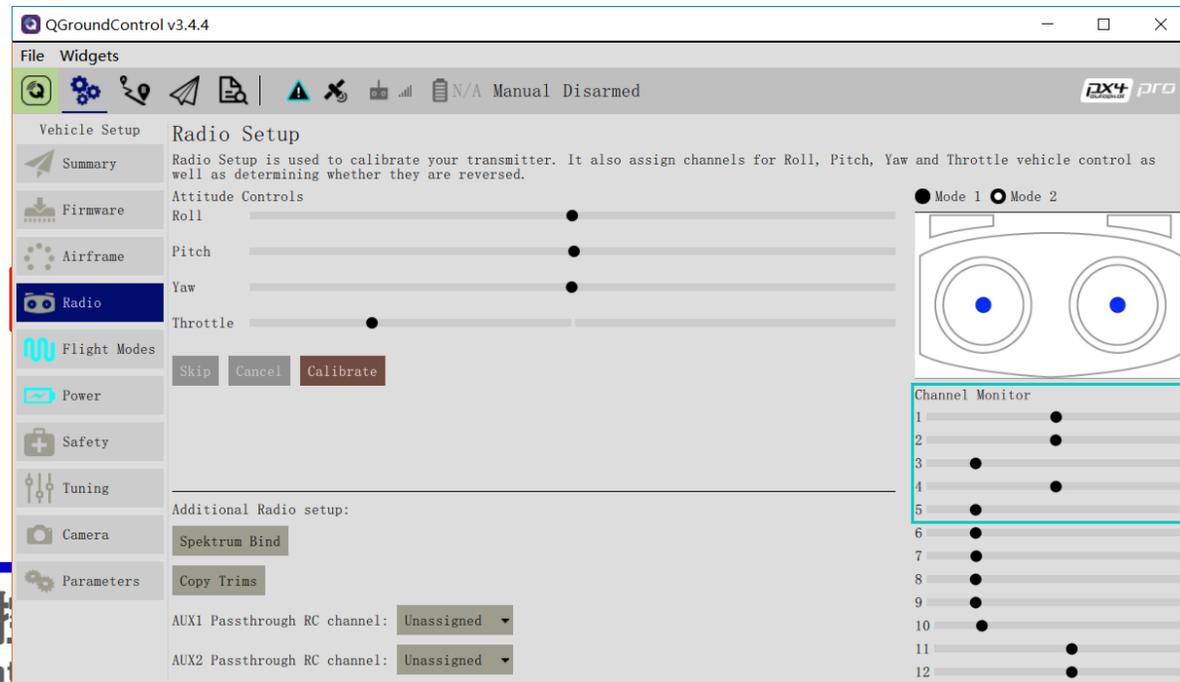
遥控器配置 (1) 乐迪AT9S遥控器

检查遥控器与接收机正确连接方法：

- 1、正确连接自驾仪与接收机，用USB数据线连接自驾仪与电脑，打开遥控器，打开QGroundControl地面站软件。
- 2、等待地面站成功连接上Pixhawk后，按右图所示，点击“齿轮”按钮进入设置页面，再点击“Radio”（遥控器）按钮，进入右图的遥控器配置页面
- 3、如果可以观察到右图最右侧的“Channel Monitor”下面显示各个通道和滑块，且推动遥控器上的摇杆滑块会随之移动，说明接收机已经配置并连接正确。否则，需要重新确认之前步骤是否正确。



注：箭头表示PWM值增大的拨动方向

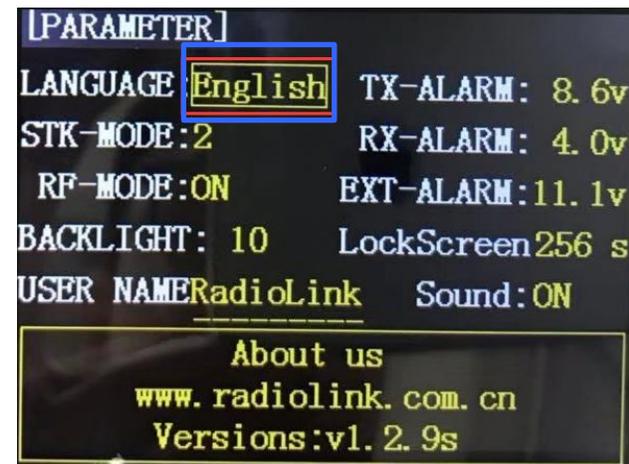
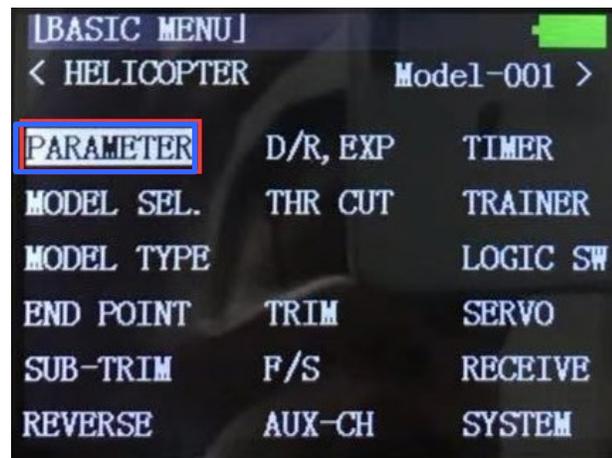




硬件平台配置

遥控器配置 (1)乐迪AT9S遥控器

- 1) 向上拨“开关”，打开遥控器
- 2) 设置语言为中文以及关闭声音
 - 长按遥控器按键面板的“模式”按钮，弹出下左图的模型设置页面。
 - 滚动遥控器上的“方向滚轮”，
 - 将光标移动到上图的“PARAMETER”上，
 - 按下遥控器面板右侧的“确定”按钮，即可进入遥控器参数设置页面，
 - 滚动遥控器面板的“方向滚轮”选中“English”条目

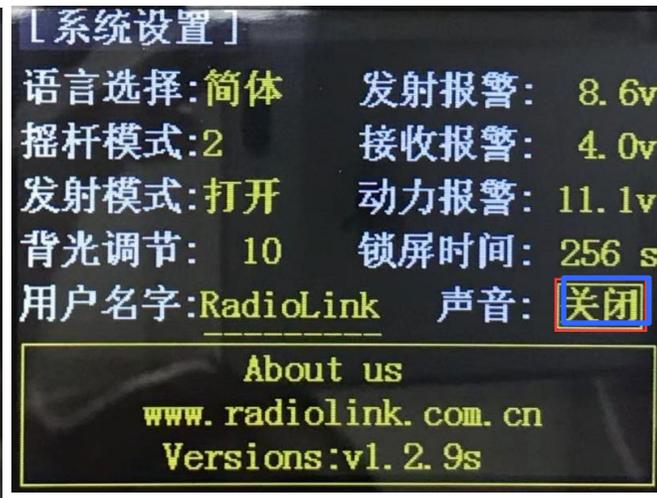
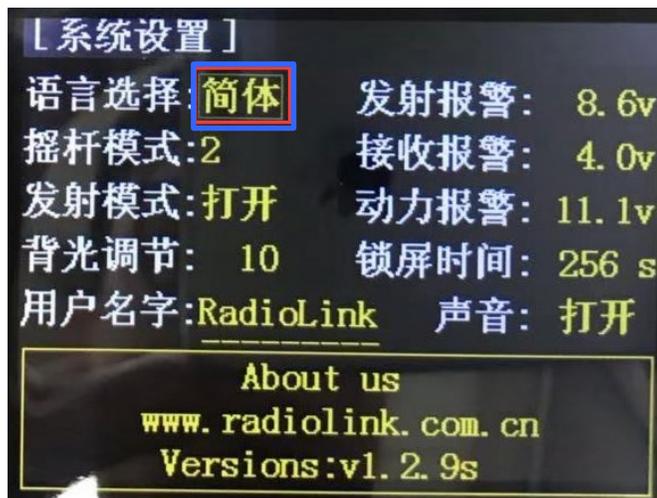




硬件平台配置

□ 遥控器配置 (1)乐迪AT9S遥控器

- 点击遥控器“确定”按钮
- 再滚动“方向滚轮”
- 将语言改变为下图所示的“简体”
- 然后点击遥控器“确定”按钮，即可将语言设置为中文
- 通过同样的方法，如图所示，将声音选项从“打开”调整为“关闭”



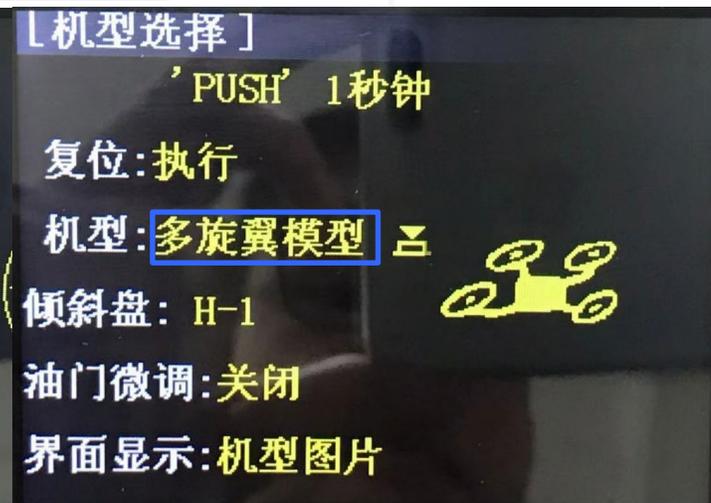
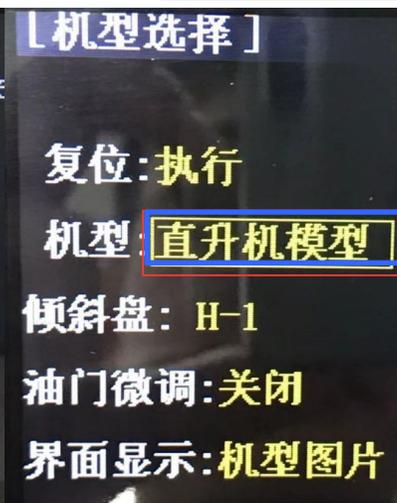
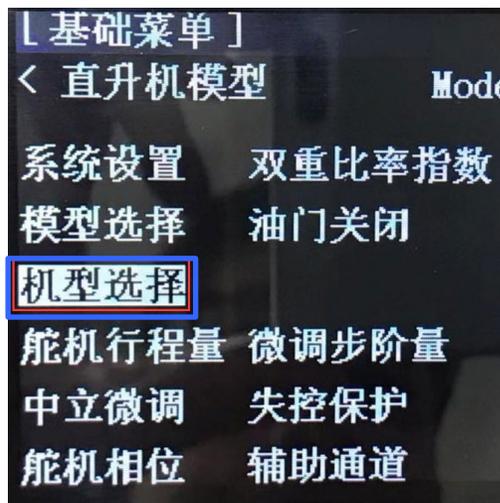


硬件平台配置

遥控器配置 (1)乐迪AT9S遥控器

3) 多旋翼模式设置

- 长按遥控器面板的“模式”按钮，进入下图所示的“基础菜单”设置界面，点击“机型选择”，进入下图所示的机型选择页面。
- 在“机型”条目，将“直升机模型”更改为“多旋翼模型”，然后长按遥控器面板的“确定”按钮超过一秒，如下图所示，将遥控模式设置为多旋翼。





硬件平台配置

遥控器配置 (1)乐迪AT9S遥控器

4) 油门通道反向设置

- 乐迪遥控器的多旋翼模式的油门通道与Pixhawk的定义是相反的，因此需要进行调整。
- 长按遥控器面板的“模式”按钮，
- 进入下图所示的“基础菜单”设置界面，并选中“舵机相位”条目。
- 在“舵机相位”条目设置页面，将油门从“正相”修改为“反相”。



【基础菜单】			【舵机相位】	
< 多旋翼模型	Model-001 >		三通:油门	1:副翼 正相
系统设置	双重比率指数	定时器	反相 正相	2:升降 正相
模型选择	油门关闭	教练功能		→3:油门 反相
机型选择		逻辑开关		4:尾舵 正相
舵机行程量	微调步阶量	能量显示		5:姿态 正相
中立微调	失控保护	回传信息	九通: 正相	6:辅助一 正相
舵机相位	辅助通道	功能设置	十通: 正相	7:辅助二 正相
				8:辅助三 正相

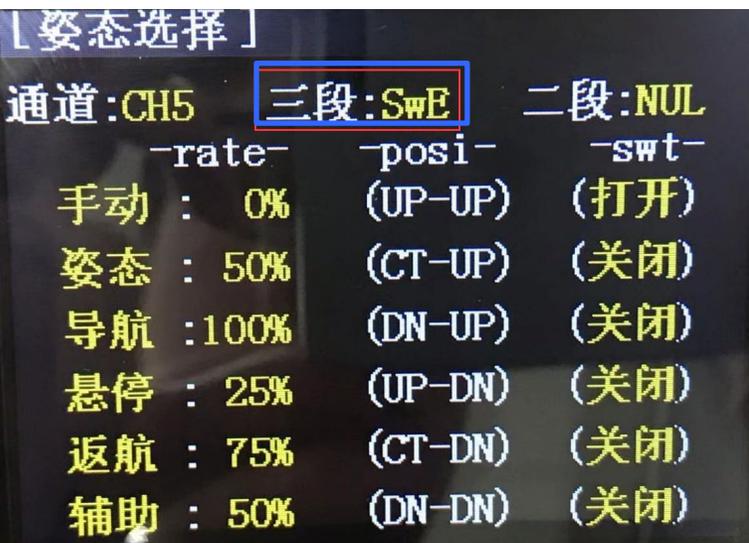
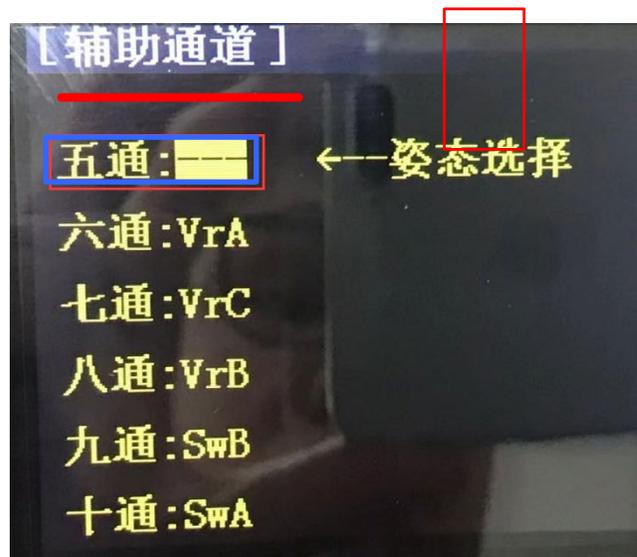
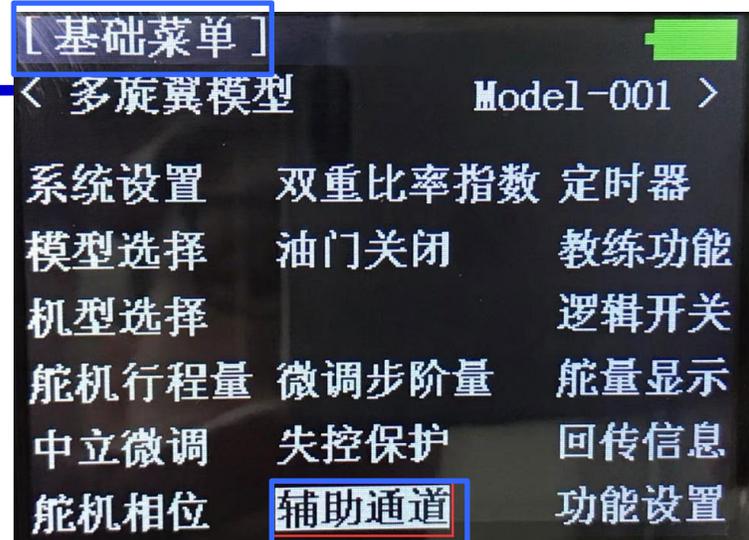


硬件平台配置

遥控器配置 (1)乐迪AT9S遥控器

5) CH5模式切换通道设置

- 由于实验需求，需要将遥控器的第五通道（CH5）映射为左上角的三段开关，用于控制器的模式切换使用。
- 长按遥控器面板的“模式”按钮，进入下图所示的“基础菜单”设置界面，并进入“辅助通道”条目。
- 按下图所示，进入“五通”设置页面，将CH5映射为遥控器的三段开关“SwE”（左上角前沿面开关“E”）。同理设置CH6位“SwG”。





硬件平台配置

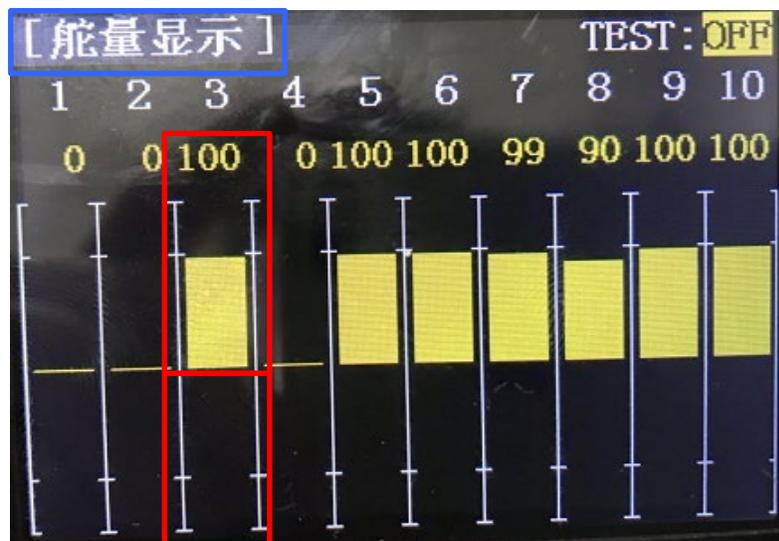
遥控器配置 (1)乐迪AT9S遥控器



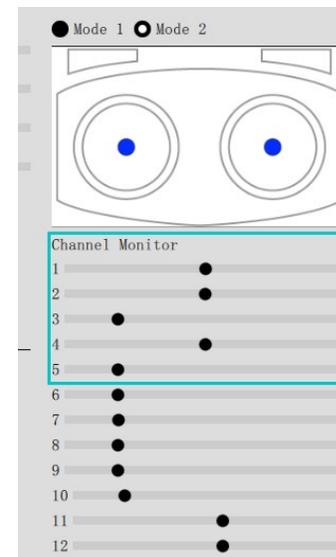
6) 通道确认

在主页面，按下遥控器的“返回”按钮，可以出现如下“舵量显示”界面，此时拨动各个摇杆可以看到每个通道PWM值得变化情况。

注意：下图界面黄色区域上侧100对应PWM值1100 (QGC的Channel Monitor中对应通道滑块位于左侧)，黄色区域下侧100对应PWM值1900 (QGC的Channel Monitor对应通道滑块位于右侧)。



QGC中Channel Monitor页



注意：因为各种误差的存在，实际自驾仪接收到的PWM信号并不完全等于1100-1900的范围，例如乐迪遥控器的范围通常为1065 -1933（可以如右下图在QGC中设置 - Parameters - Radio Calibration页面查看）。因此，遥控器校准对于自驾仪正常识别飞控手从遥控器发送的指令至关重要。遥控器校准可以在QGC地面站的Radio页面中实现。

Safety	Mount	RC18_MIN	1000.000 us	RC channel 18 minimum
		RC18_REV	Normal	RC channel 18 reverse
Tuning	Multiicopter Attitude Control	RC18_TRIM	1500.000 us	RC channel 18 trim
		RC1_DZ	10.000 us	RC channel 1 dead zone
Camera	Multiicopter Position Control	RC1_MAX	1932.000 us	RC channel 1 maximum
		RC1_MIN	1065.000 us	RC channel 1 minimum
Parameters	Radio Calibration	RC1_REV	Normal	RC channel 1 reverse
		RC1_TRIM	1499.000 us	RC channel 1 trim
	Radio Switches			
	Return Mode			



硬件平台配置

□ 遥控器配置 (1)乐迪AT9S遥控器

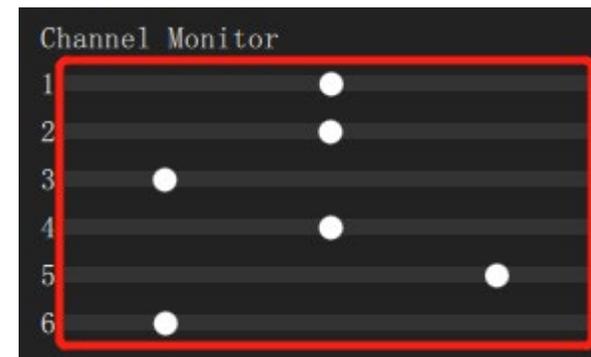
6) 通道确认

依次拨动各个摇杆，确定各个通道按如下规则正确定义：

- CH1：对应滚转控制，从左到右对应PWM值为1100到1900 (QGC的Channel Monitor的1号滑块从左移动到右)。
- CH2：对应俯仰控制，从上到下对应PWM值为1100到1900。(QGC的Channel Monitor的2号滑块从左移动到右)。
- CH3：对应油门控制，从上到下对应PWM值为1900到1100（注意，这里和CH2是相反的，QGC3号滑块从右到左）。
- CH4：对应偏航控制，从左到右对应PWM值为1100到1900。
- CH5/6：对应模式控制，SE摇杆（最左上侧），这是一个三段开关，顶部（最远离使用者的档位）、中部和底部（最靠近使用者的档位）档位对应PWM值为1100、1500和1900。



注：箭头表示PWM值增大的拨动方向

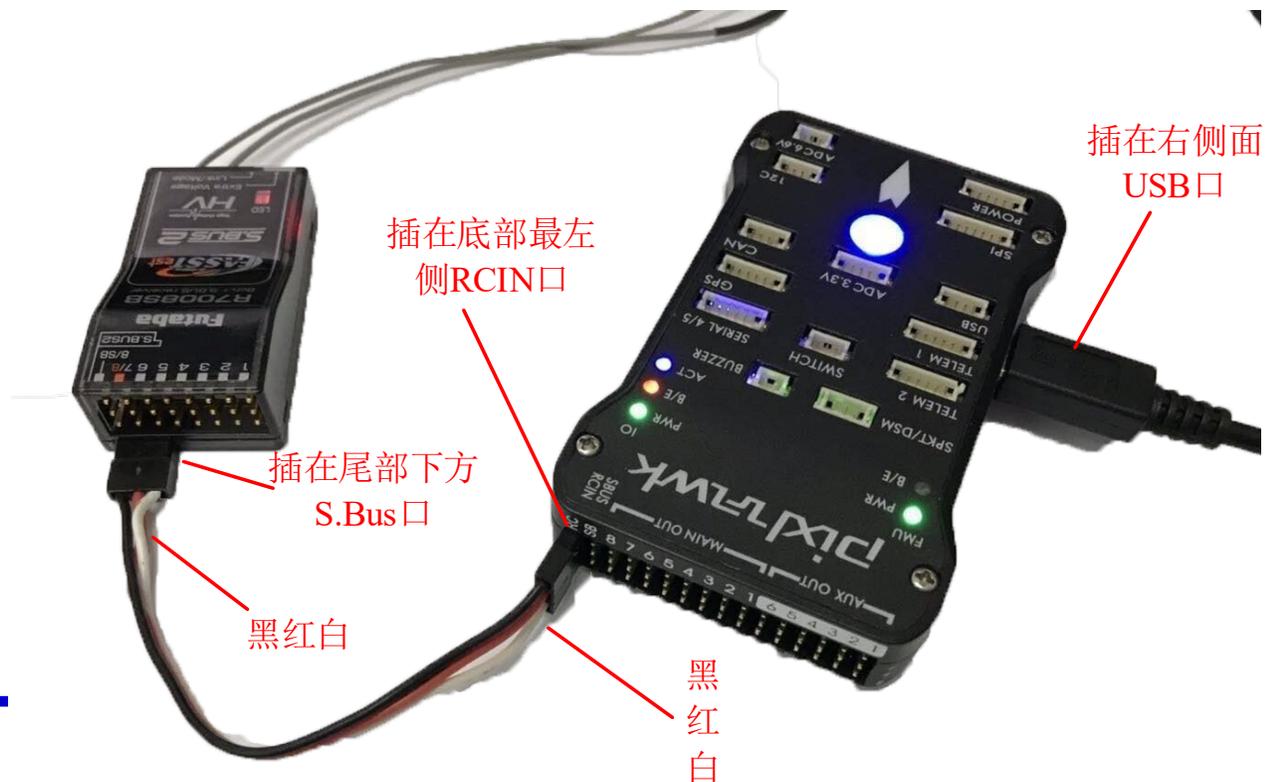




硬件平台配置

□ 遥控器配置 (2) Futaba T14SG

接收机与Pixhawk自驾仪的连接方式与乐迪接收机有一些区别，具体连接方式详见下图。遥控器设置方法类似。



注：箭头表示PWM值增大的拨动方向



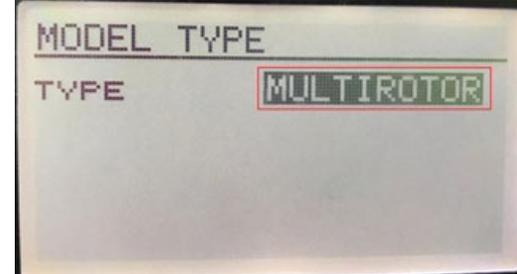
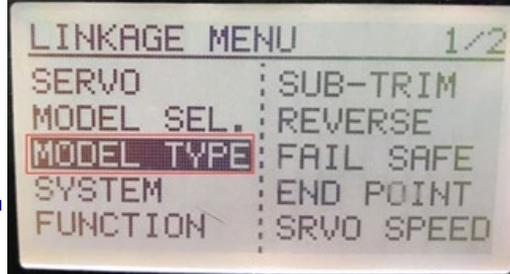
硬件平台配置

□ 遥控器配置 (2) Futaba T14SG

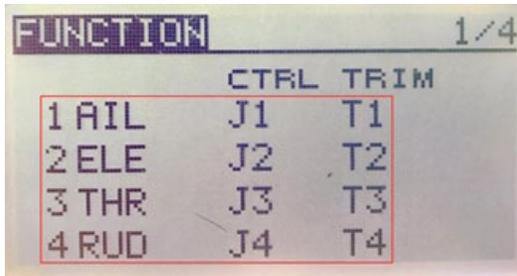
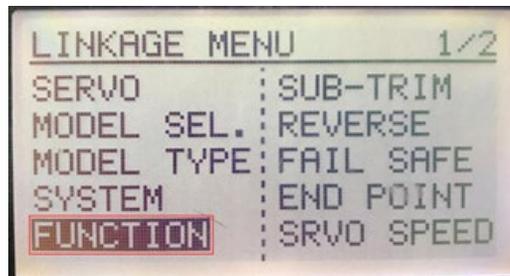
遥控器J1 摇杆（CH1 滚转通道）、J2 摇杆（CH2 俯仰通道）、J3 摇杆（CH3 油门通道）、J4 摇杆（CH4 偏航通道）、SE 三段开关（左上侧开关，CH5 模式通道）和SG 三段开关（右上侧开关，CH6 模式通道）。

Futaba T14SG 遥控器的基本设置右图：

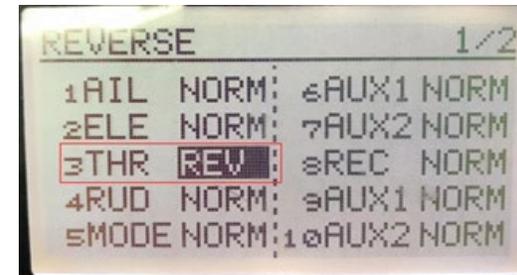
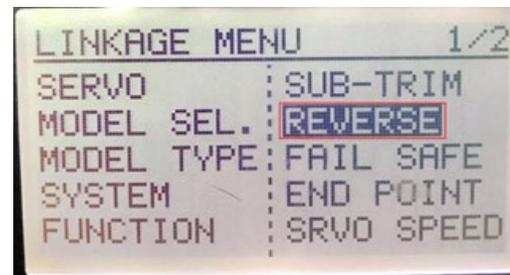
- 1) 选择进入“MODEL TYPE”（机型选择）页面，选择“TYPE”为“MULTIROTOR”；
- 2) 在“FUNCTION”（功能）页面设置第一到第四通道，依次对应J1 到 J4 摇杆；
- 3) “REVERSE”（舵机相位）页面，设置“THR”（油门）通道为“REV”（反向）。
- 4) “FUNCTION”（功能）页面设置5、6通道为左右上角三段开关“SE”和“SG”。
- 5) 同乐迪遥控器确认各个通道PWM输出与需求相符。



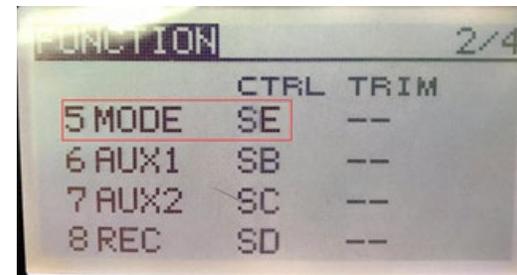
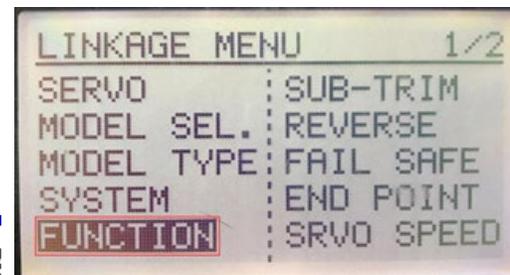
(a) 遥控模型设置



(b) 摇杆通道映射



(c) 油门通道反向



(d) 模式切换通道设置

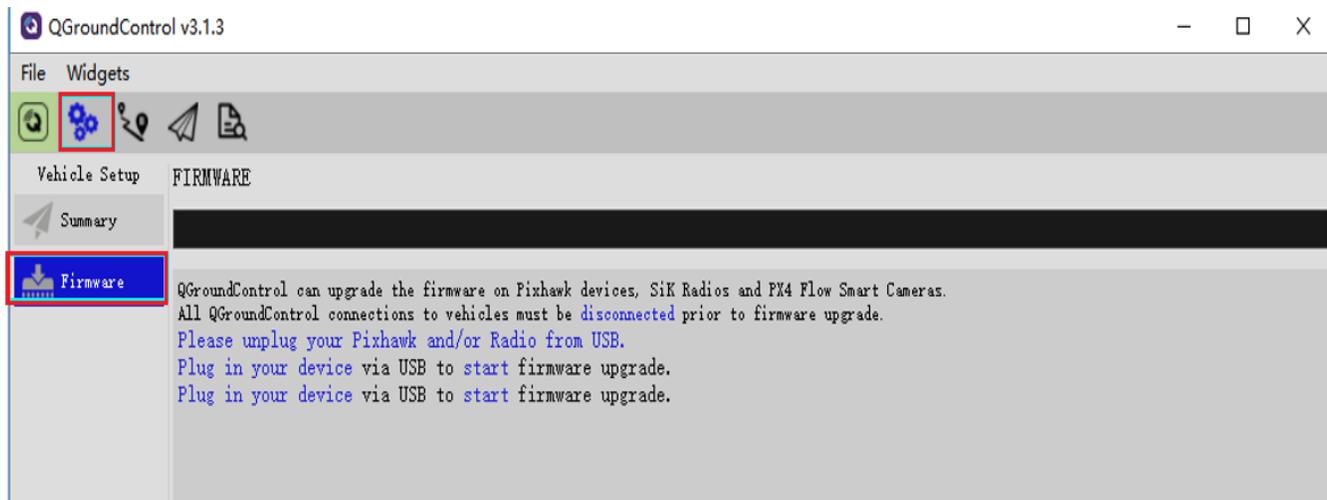


硬件平台配置

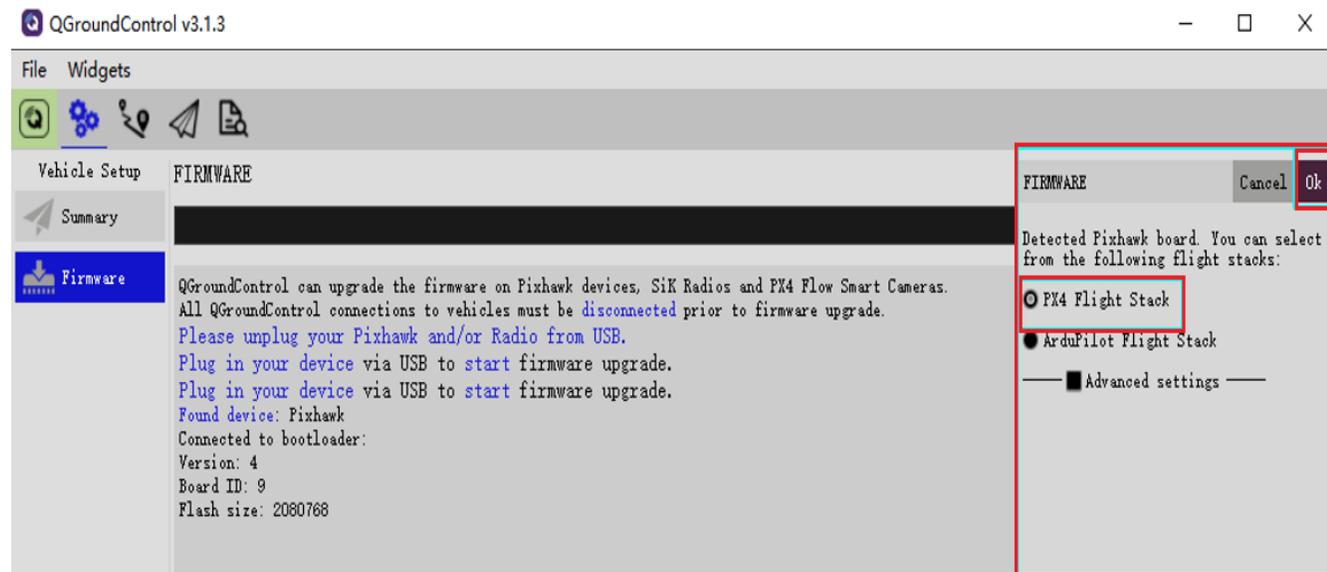
□ Pixhawk系统配置

为了使Pixhawk自驾仪的配置满足本实验需求，需要进行一些基本的固件烧录与模式配置操作，确保自驾仪功能正常且配置正确。方法如下：

- 1) 打开QGC地面站软件；
- 2) 如右图上所示，点击工具栏齿轮图标进入设置页面，再点击“Firmware”标签进入固件烧录页面；
- 3) 用USB线连接Pixhawk自驾仪与电脑，此时软件会自动识别Pixhawk硬件，如右下图所示所示，在界面右侧弹出固件配置窗口，勾选“PX4 Flight Stack”，然后点击“OK”，QGC开始自动下载（需联网，无法联网请参考下一讲使用本地固件）并安装最新的PX4固件到Pixhawk中；



(a) 设置页面



(b) 固件烧录页面

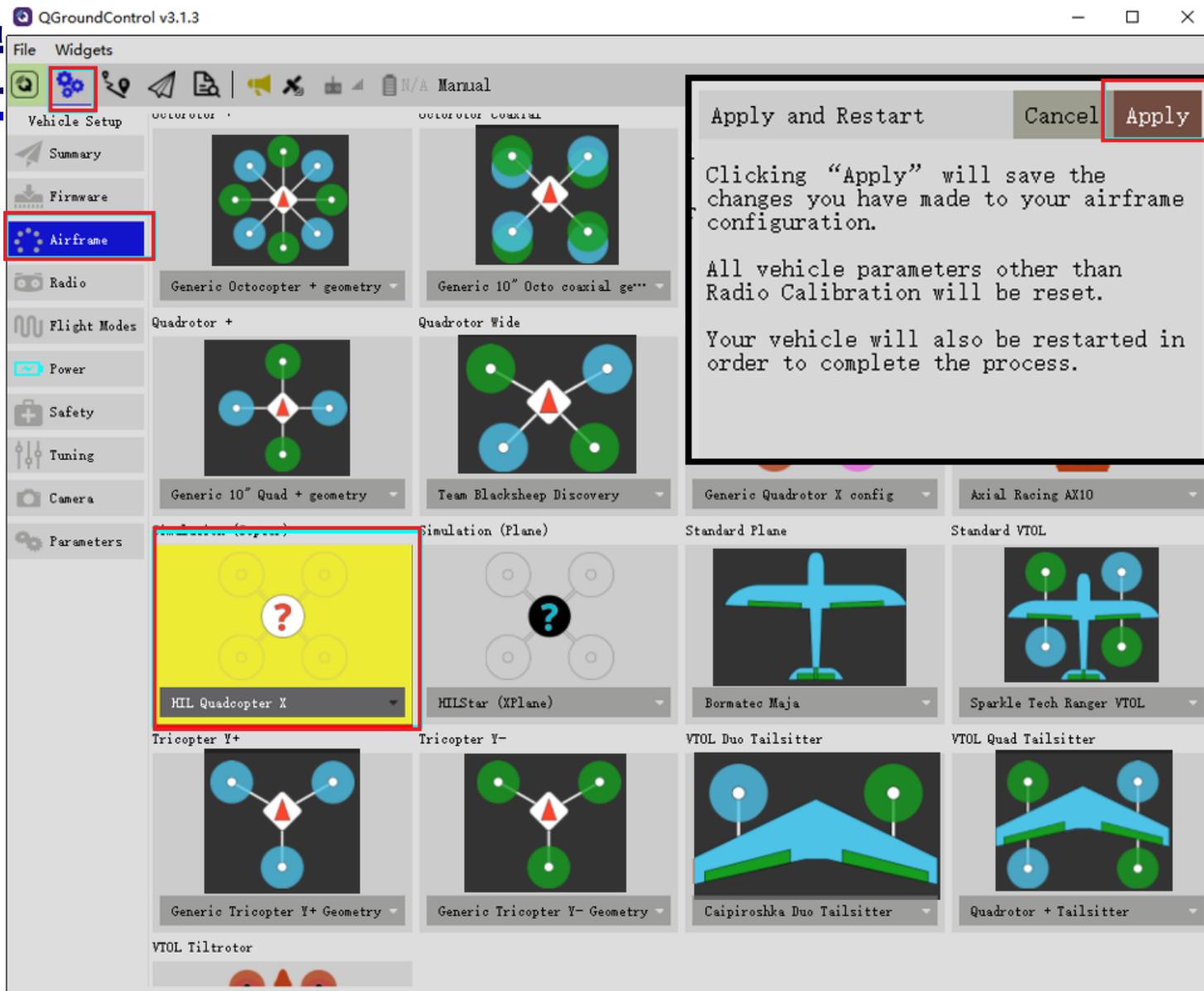


硬件平台配置

□ Pixhawk系统配置

4) 完成固件烧录后，自驾仪会自动重启并连接到QGC上；此时，如右图所示，进入“Airframe”标签页，选择机架类型为“HIL Quadcopter X”，然后点击右上角的“Apply and Restart”按钮，此时自驾仪会自动重启；

5) 重启后QGC会自动寻找串口并连接到Pixhawk，此时查看各个配置页，确保Pixhawk进入硬件在环仿真模式且没有警告项出现。



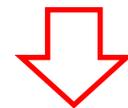


硬件平台配置

□ 机架和动力系统配置

课程模型对应轴距（对侧电机距离）为450mm的小型四旋翼，重量为1.4kg。为了顺利进行后续的飞行实验，需要确保多旋翼的配置与提供模型尽量接近。本书实验选择目前最受欢迎的F450多旋翼配置，读者可以自行购买零件组装，或者直接购买整机。如右图所示为F450组装示意图，具体组成如下：

- 1) 机架：DJI风火轮F450机架
 - 2) 动力系统：DJI E310动力套装（电机、电调、螺旋桨）
 - 3) 电池：格氏LiPo电池，4000mAh-3S(11.1V)-25C
 - 4) 自驾仪：Pixhawk 1 (2M 闪存)套装，
 - 5) GPS模块：型号：Ublox NEO-M8N
 - 6) 其他配件：电源模块、蜂鸣器、安全开关和减震器
- 组装方法可参考PX4官网 <https://docs.px4.io>





小结

- (1) 本课程提供的RflySim基础版平台总体可以分为两个部分：硬件平台和软件平台。硬件平台包含了计算机、自驾仪、遥控器等；软件平台包含了MATLAB/Simulink、CopterSim、QGroundControl等工具。本讲详细介绍了软硬件平台的组成与配置方法。
- (2) 本讲内容主要面对独立学习读者或者实验课程老师，需要完成RflySim软硬件平台的部署，并准备好实际飞行实验的平台。
- (3) 对于学生而言，如果老师已经布置好了实验平台，可以跳过本讲的平台配置内容，直接在搭建的平台上开始后续课程的学习与实验。
- (4) 如有疑问，请到 <https://rflysim.com> 查询更多信息。



资源

- 本课程的所有课件、视频和源码将会发布在官方网站: <https://rflysim.com/zh>
- 更详细的内容可以参考我们的教材: 全权, 戴训华, 王帅著. 《多旋翼飞行器设计与控制实践》. 北京: 电子工业出版社. 2020
- 扫描二维码关注可靠飞行控制研究组公众号 [buaarfly](#) (文章、资讯等)
- 多旋翼控制实践课程交流QQ群: [951534390](#) (答疑、资料分享等)
- 如果遇到任何问题, 也可以在我们的Github页面查找答案或提问
<https://github.com/RflySim/RflyExpCode/issues>
- 针对无人机/无人车的视觉/集群/AI等顶层控制算法的快速开发与验证, RflySim同时推出了高级版平台和课程, 请访问我们的网站了解更多
https://rflysim.com/zh/4_Pro/Advanced.html
- 我们的官方联系邮箱是: rflysim@163.com





谢谢!