



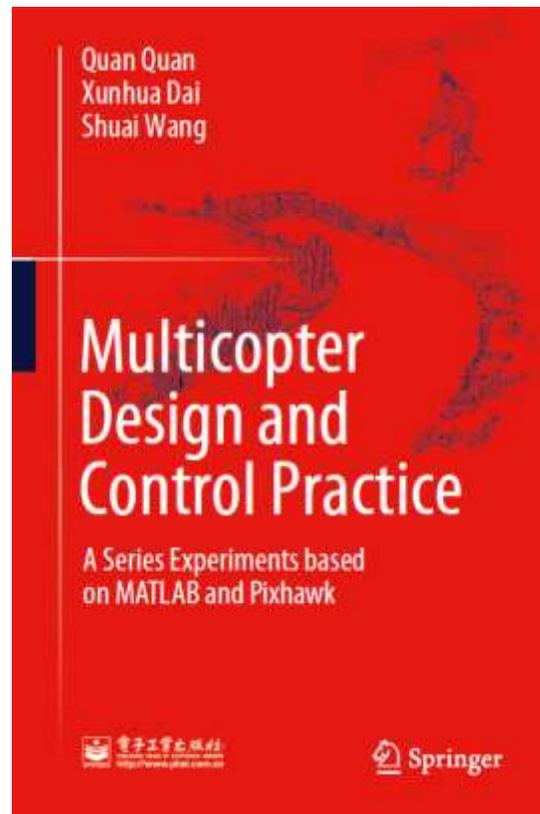
RflySim 底层飞行控制算法开发 系列课程

第一讲 课程介绍



大纲

1. 多旋翼
2. 教育的新需求
3. RflySim平台
4. 课程设置
5. 如何开发自驾仪系统
6. 总结





多旋翼

□常见无人机分类



(a)固定翼



(b)直升机



(c)多旋翼

(1) 固定翼

优点：续航时间最长、飞行效率最高、载荷最大

缺点：必须要助跑，降落的时候必须要滑行

(2) 直升机

优点：垂直起降

缺点：续航时间没有优势，机械结构复杂、维护成本高

(3) 多旋翼

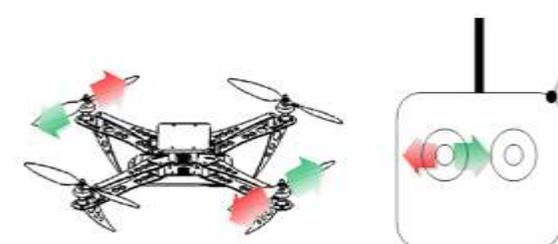
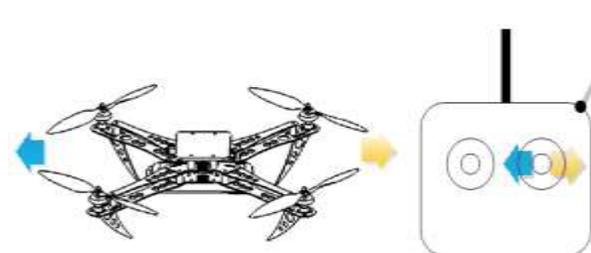
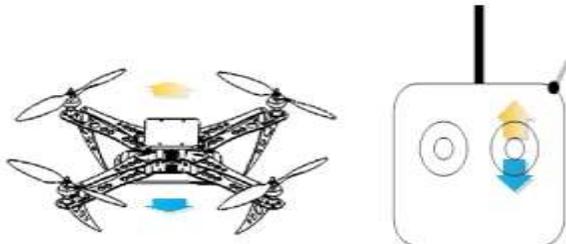
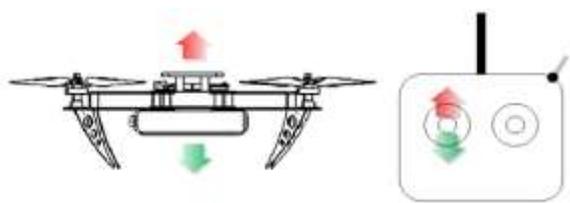
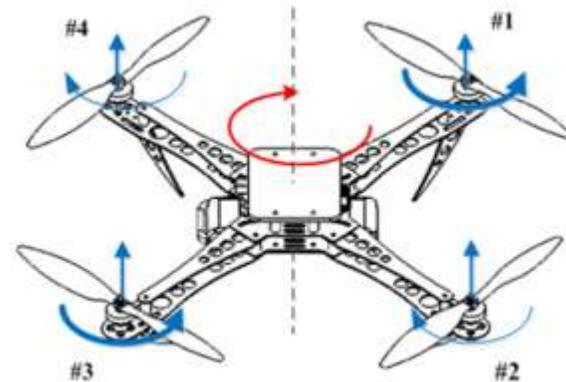
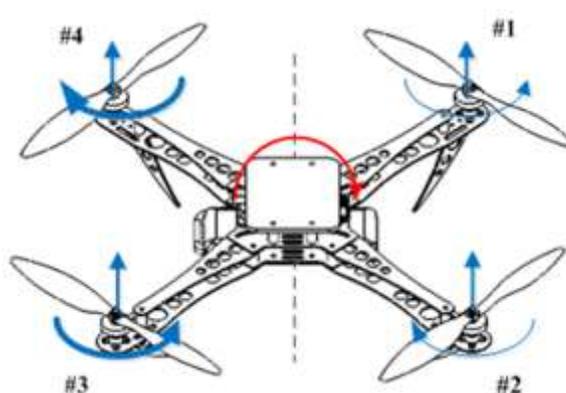
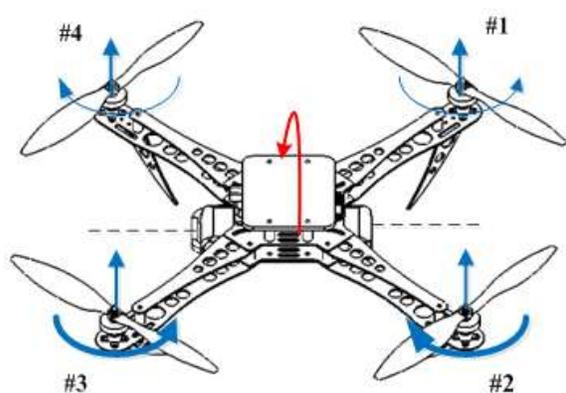
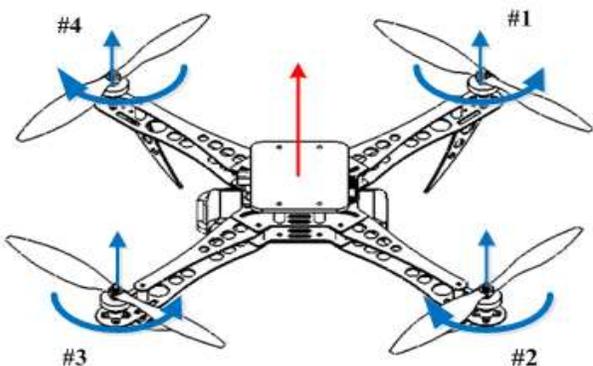
优点：垂直起降、机械结构简单、易维护

缺点：载重和续航时间都更差



多旋翼

□ 四旋翼的操控



(1) 升降运动

(2) 前后运动

(3) 左右运动

(4) 偏航运动





多旋翼

□ 无人机的评价

刚性体验

	固定翼	直升机	多旋翼
易用性	+	+	+++
可靠性	+++	+	+++
勤务性	++	+	+++
续航性	+++	++	+
承载性	+++	++	+

运动相互解耦

无机械磨损

结构简单、模块化

刚性体验让人们选择了多旋翼，无人机教育从多旋翼入手



多旋翼

□ 多旋翼涉及的学科

- 多旋翼飞行器麻雀虽小，但五脏俱全
- 它基本横跨力学、机械工程、电子科学与技术、信息与通信工程、电气工程、仪器科学与技术、控制科学与工程、计算机科学与技术等八个一级学科。
- 多旋翼飞行器这些特点可以为相应学科方法测试提供看得见摸得着的实践，特别是控制实践方面。



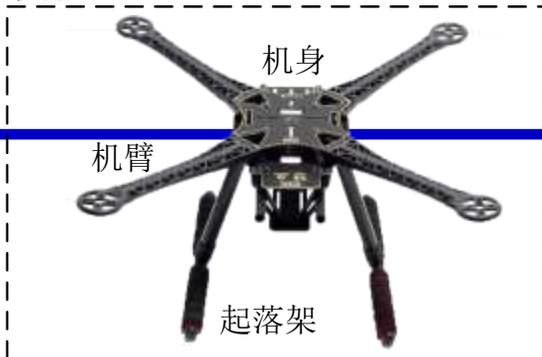


多旋翼

多旋翼涉及的学科

- 多旋翼飞行器麻雀虽小，但五脏俱全
- 它基本横跨力学、机械工程、**电子科学与技术**、**信息与通信工程**、电气工程、仪器科学与技术、控制科学与工程、计算机科学与技术等八个一级学科。
- 多旋翼飞行器这些特点可以为相应学科方法测试提供看得见摸得着的实践，特别是控制实践方面。

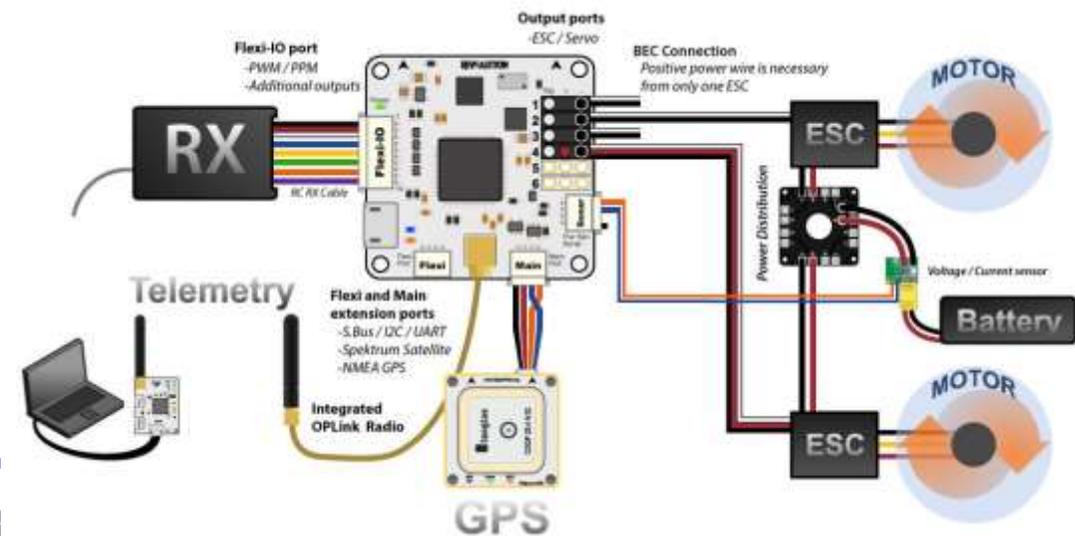
机架



动力系统



指挥控制系统





多旋翼

□ 多旋翼涉及的学科

- 多旋翼飞行器麻雀虽小，但五脏俱全
- 它基本横跨力学、机械工程、电子科学与技术、信息与通信工程、**电气工程、仪器科学与技术、控制科学与工程、计算机科学与技术**等八个一级学科。
- 多旋翼飞行器这些特点可以为相应学科方法测试提供看得见摸得着的实践，特别是控制实践方面。

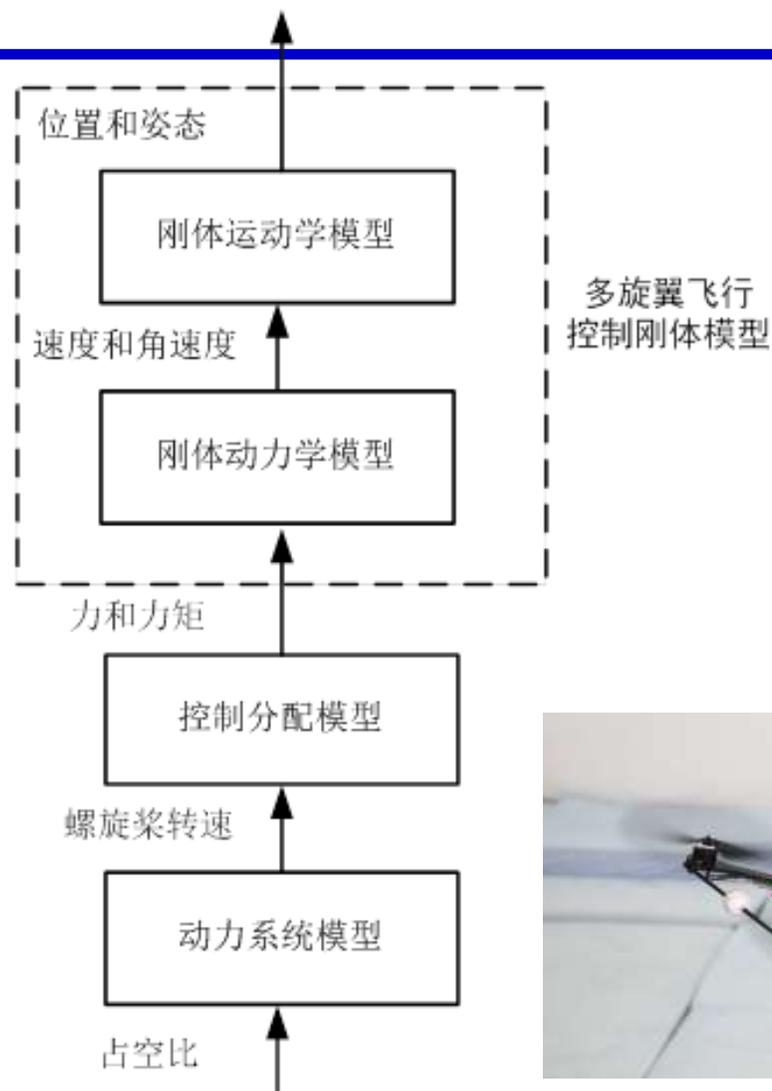




多旋翼

□ 多旋翼涉及的学科

- 多旋翼飞行器麻雀虽小，但五脏俱全
- 它基本横跨力学、机械工程、电子科学与技术、信息与通信工程、电气工程、仪器科学与技术、**控制科学与工程**、计算机科学与技术等八个一级学科。
- 多旋翼飞行器这些特点可以为相应学科方法测试提供看得见摸得着的实践，特别是控制实践方面。





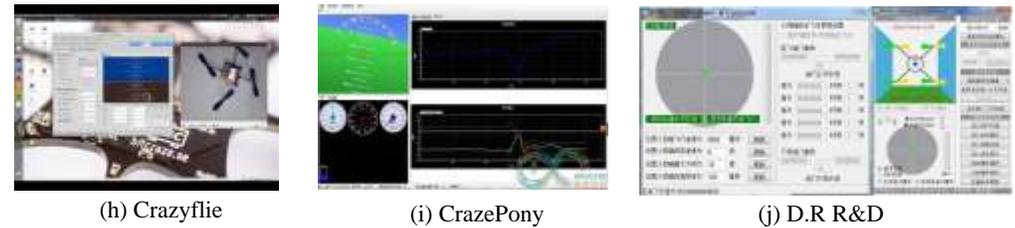
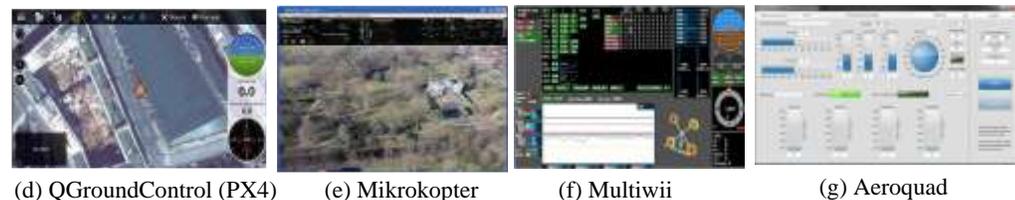
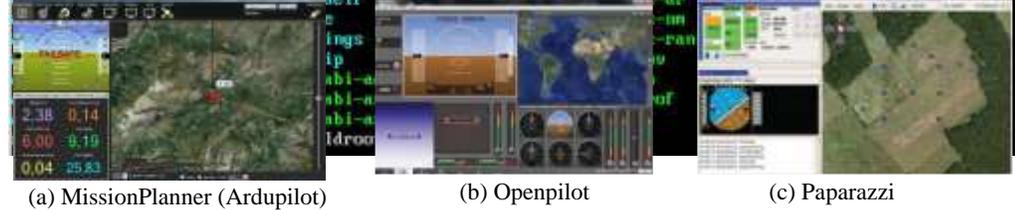
多旋翼

多旋翼涉及的学科

- 多旋翼飞行器麻雀虽小，但五脏俱全
- 它基本横跨力学、机械工程、电子科学与技术、信息与通信工程、电气工程、仪器科学与技术、控制科学与工程、**计算机科学与技术**等八个一级学科。
- 多旋翼飞行器这些特点可以为相应学科方法测试提供看得见摸得着的实践，特别是控制实践方面

```

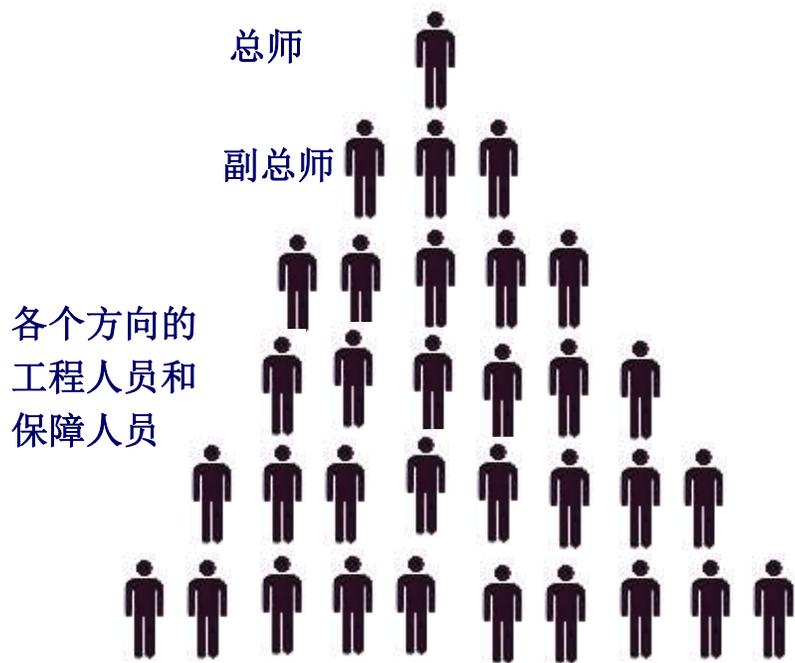
Making install in frontends
making install in conf
/bin/mkdir -p /home/reclone/nuttx-git/buildroot/build_arm_hf/staging_dir/bin
/bin/bash ./../libtool --mode=install /usr/bin/install -c conf /home/reclone/nuttx-git/buildroot/build_arm_hf/staging_dir/bin/.kconfig-conf
libtool: install: /usr/bin/install -c conf /home/reclone/nuttx-git/buildroot/build_arm_hf/staging_dir/bin/.kconfig-conf
Making install in nconf
/bin/mkdir -p /home/reclone/nuttx-git/buildroot/build_arm_hf/staging_dir/bin
/bin/bash ./../libtool --mode=install /usr/bin/install -c nconf /home/reclone/nuttx-git/buildroot/build_arm_hf/staging_dir/bin/.kconfig-nconf
libtool: install: /usr/bin/install -c nconf /home/reclone/nuttx-git/buildroot/build_arm_hf/staging_dir/bin/.kconfig-nconf
making install in scripts
make[1]: Leaving directory '/home/reclone/nuttx-git/buildroot/toolchain_build_arm_hf/kconfig-frontends-3.12.0.0'
touch /home/reclone/nuttx-git/buildroot/toolchain_build_arm_hf/kconfig-frontends-3.12.0.0/.installed
reclone@nuttxer:~/nuttx-git/buildroot$ ls build_arm_hf/staging_dir/bin
arn-elf-addr2line  arn-elf-gdb  arn-muttx-eabi-c++  arn-muttx-eabi-ld.bfd
arn-elf-ar  arn-elf-gprof  arn-muttx-eabi-cc  arn-muttx-eabi-m
arn-elf-as  arn-elf-ld  arn-muttx-eabi-c++filt  arn-muttx-eabi-obcopy
arn-elf-c++  arn-elf-ld.bfd  arn-muttx-eabi-cpp  arn-muttx-eabi-obdump
arn-elf-cc  arn-elf-ldedit  arn-muttx-eabi-ranlib  arn-muttx-eabi-readelf
arn-elf-c++filt  arn-elf-obcopy  arn-muttx-eabi-g++  arn-muttx-eabi-size
arn-elf-cpp  arn-elf-obdump  arn-muttx-eabi-gcc  arn-muttx-eabi-strings
arn-elf-elfedit  arn-elf-ranlib  arn-muttx-eabi-gcc-4.9.3  arn-muttx-eabi-strip
arn-elf-ldedit  arn-elf-readelf  arn-muttx-eabi-gcc-ap
  
```





教育的新需求

传统和新形势人才对比



人员多
分工细
经验多
资源多

传统

人员少
一肩挑
经验少
资源少

新形势



- 多旋翼全栈式工程师具备多旋翼开发所需的技术、语言和系统工程概念等知识
- “全栈式”指的是完成一个工程所需的各种技能，每个组件都是一个堆栈。



教育的新需求

□ 新形势人才需求（技术能力）

□ 理论

- 构型和结构设计
- 动力系统设计
- 控制模型建立
- 状态估计
- 控制器设计
- 路径规划决策逻辑
- 健康评估、失效保护
-



□ 实践

- 开发工具
- 操作系统
- 软件编写
- 代码调试
- 试飞
-



《多旋翼设计与控制》课程

知行合一



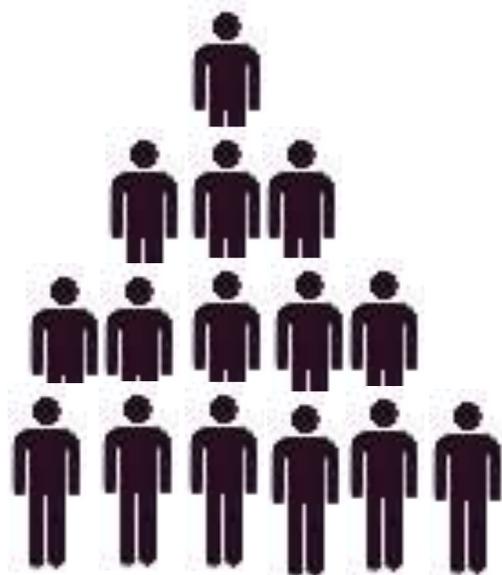
????

如何降低学习门槛？：新工具+新教程





教育的新需求



具备电子工程背景的人

教育

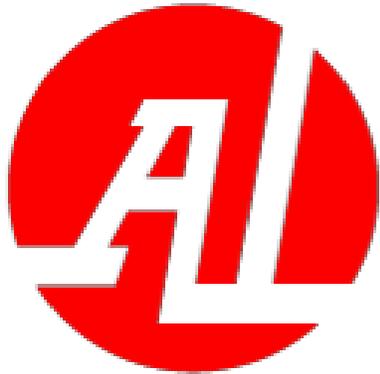
全栈式工程师

如何降低学习门槛？：新工具+新教程





RflySim平台



- RflySim是由**北航可靠飞行控制组**发布的生态系统或者说工具链。
- 它采用**基于模型设计**（Model-Based Design, MBD）的思想，可用于无人系统的控制和安全测试。因**MATLAB/Simulink**支持MBD的整个设计阶段，我们选择它们作为控制/视觉/集群算法开发的核心编程平台；同时，因**Python**是免费的且有丰富的视觉处理库，我们也支持它作为顶层视觉与集群算法开发。



RflySim平台

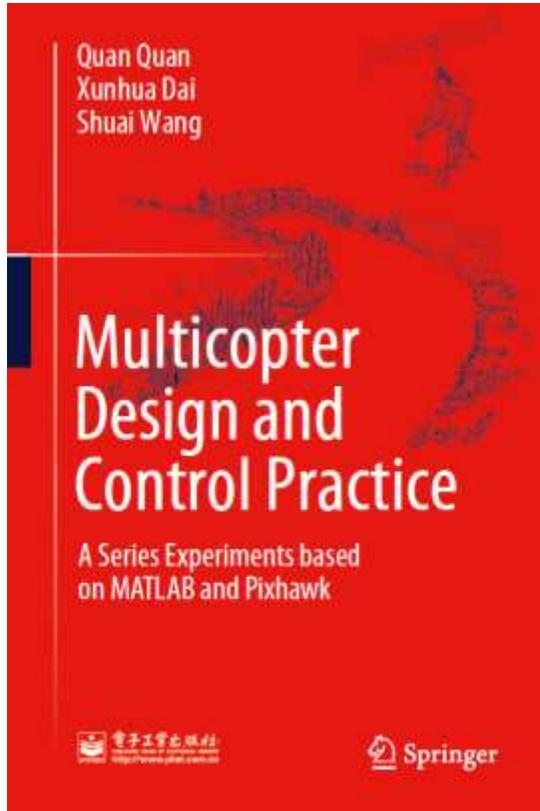


- RflySim平台目前分为了三个版本：基础版（免费）、高级体验版（免费）和高级完整版（付费，请咨询 service@rflysim.com）。
- **基础版**作为实验平台对应了《多旋翼飞行器设计与控制实践》一书，安装包体积较小，只包含了PX4底层算法Simulink开发的功能。
- **高级体验版**在基础版上增加了飞机动力学模型开发、UE4三维场景开发、视觉控制开发和集群算法开发等功能，但是限制了集群数量和分布式仿真等功能。
- **高级完整版**在体验版上增加了最新的UE4引擎、全球大场景仿真、分布式局域网集群视觉仿真等功能。
- 版本区别详见 <http://rflysim.com/doc/RflySimVersions.xlsx>





RflySim平台



- **基础版**作为实验平台对应了《多旋翼飞行器设计与控制实践》一书，安装包体积较小，只包含了PX4底层算法Simulink开发的功能。



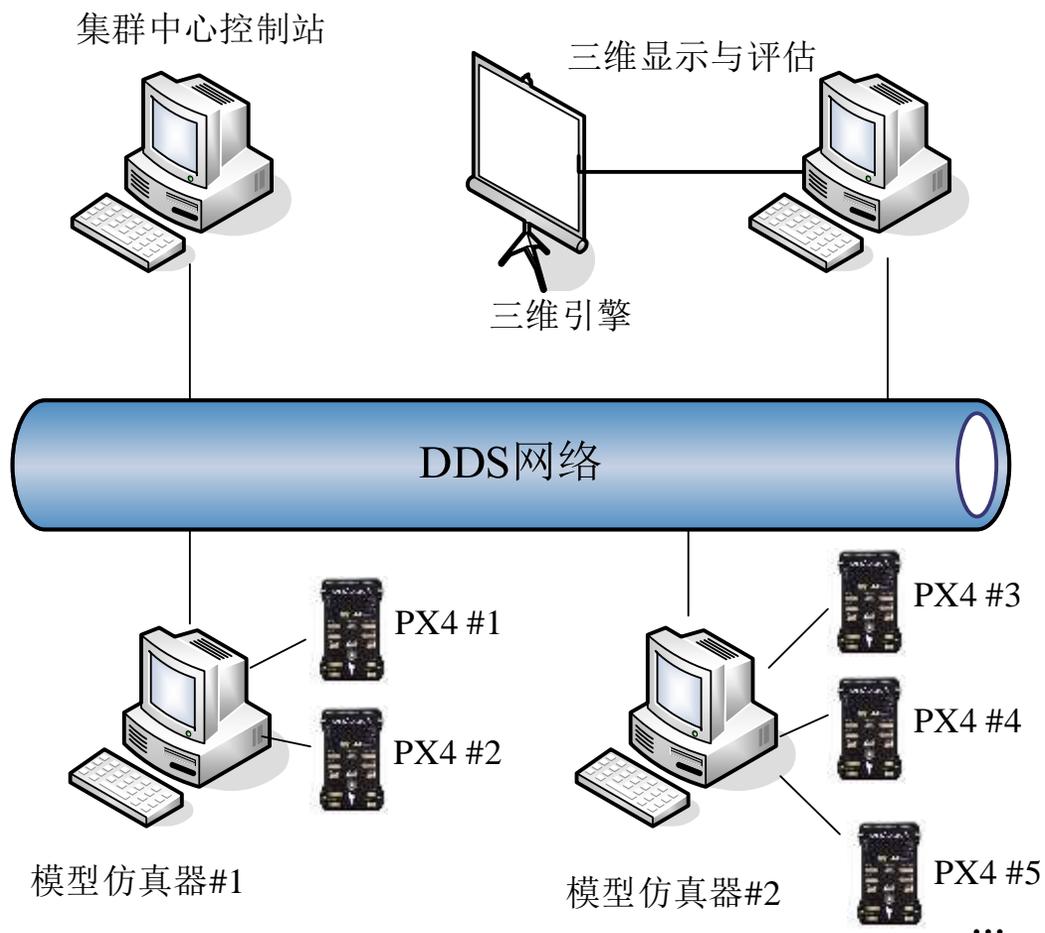
RflySim平台

- **高级体验版**保留基础版功能，开放了4个飞机集群+1个飞机视觉+不支持分布式仿真+仅限多旋翼和固定翼的DLL模型生成+无RflySim最新实用功能。





RflySim平台



■ RflySim商业版核心包括我们为此专门设计的开发的模型以及硬件在环仿真硬件系统设计等

- ① 易用性。
- ② 分布式构架。
- ③ 无人机集群仿真。
- ④ 多种机型仿真。
- ⑤ 高逼真的3D环境。
- ⑥ 基于视觉的控制。



RflySim平台

- 如何获取：<https://rflysim.com/download.html>

请填写好联系方式，我们会将最新的【RflySim基础版】和【RflySim高级版下载链接发送到您的邮箱。由于邮箱回复存在一定延迟，请您耐心等几分钟再去检查收件箱；如果您没有收到邮件，请检查邮箱的垃圾箱；如果仍然没有发现邮件，请您更换邮箱地址或者直接发送邮件到 service@rflysim.com 来获取下载链接。

您也可以微信扫码右侧二维码，关注飞思实验室官方公众号，发送咨询文字来获取下载链接、加入技术交流群或咨询购买完整版平台等。



安装包获取链接



飞思实验室官方公众号



课程设置

□ 基础实验内容

- 软件在环仿真实验
- 自动代码生成工具箱官方例程实验
- 姿态控制实验
- 飞控官方固件还原烧录实验
- log数据记录
- uORB读写通信
- 自定义uORB消息
- 回传提示消息
- PX4控制器的外部通信
- QGC实时调整控制器参数

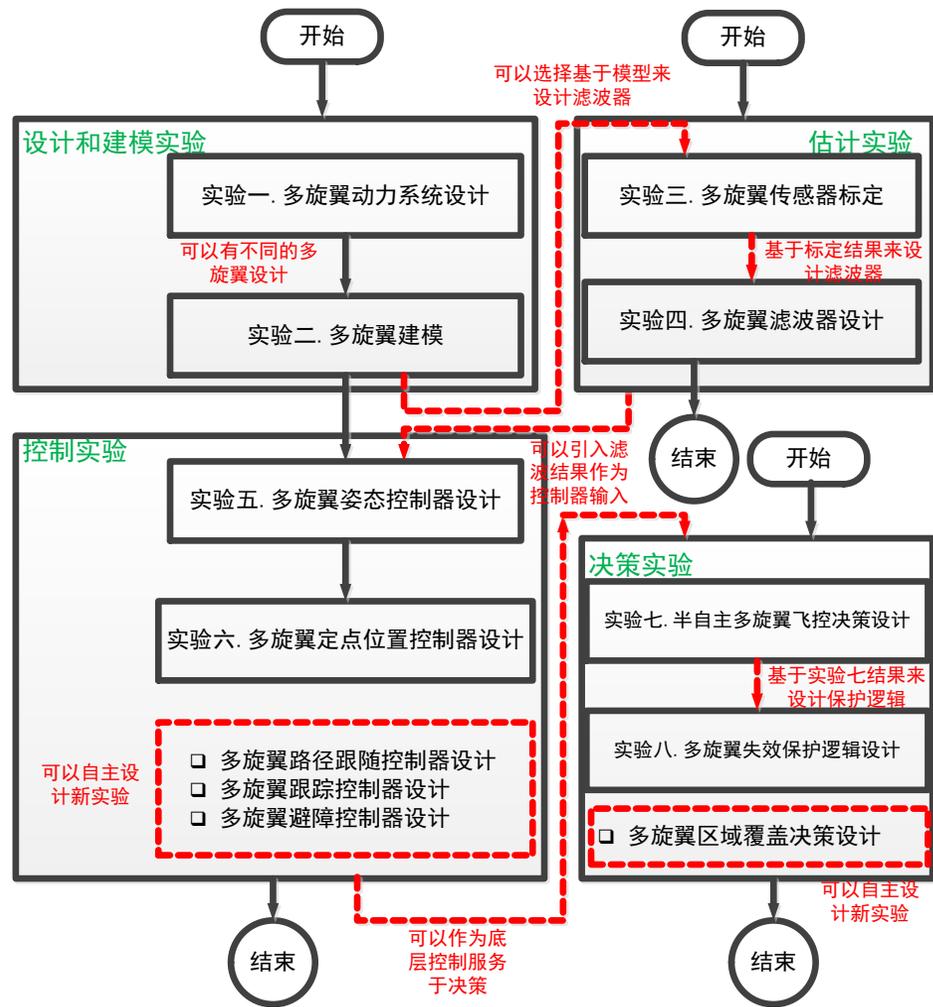
1.SoftwareSimExps	2023/4/18 18:10	文件夹
2.PSPOfficialExps	2023/4/18 18:10	文件夹
3.DesignExps	2023/4/20 10:06	文件夹
4.PX4Firmwares	2023/4/18 18:11	文件夹
5.Log-Write-Read	2023/4/18 18:11	文件夹
6.uORB-Read-Write	2023/4/18 18:11	文件夹
7.uORB-Create	2023/4/18 18:11	文件夹
8.Mavlink-Msg-Echo	2023/4/18 18:11	文件夹
9.PX4CtrlExternalTune	2023/4/23 19:39	文件夹
10.QGC-Param-Tune	2023/4/18 18:10	文件夹



课程设置

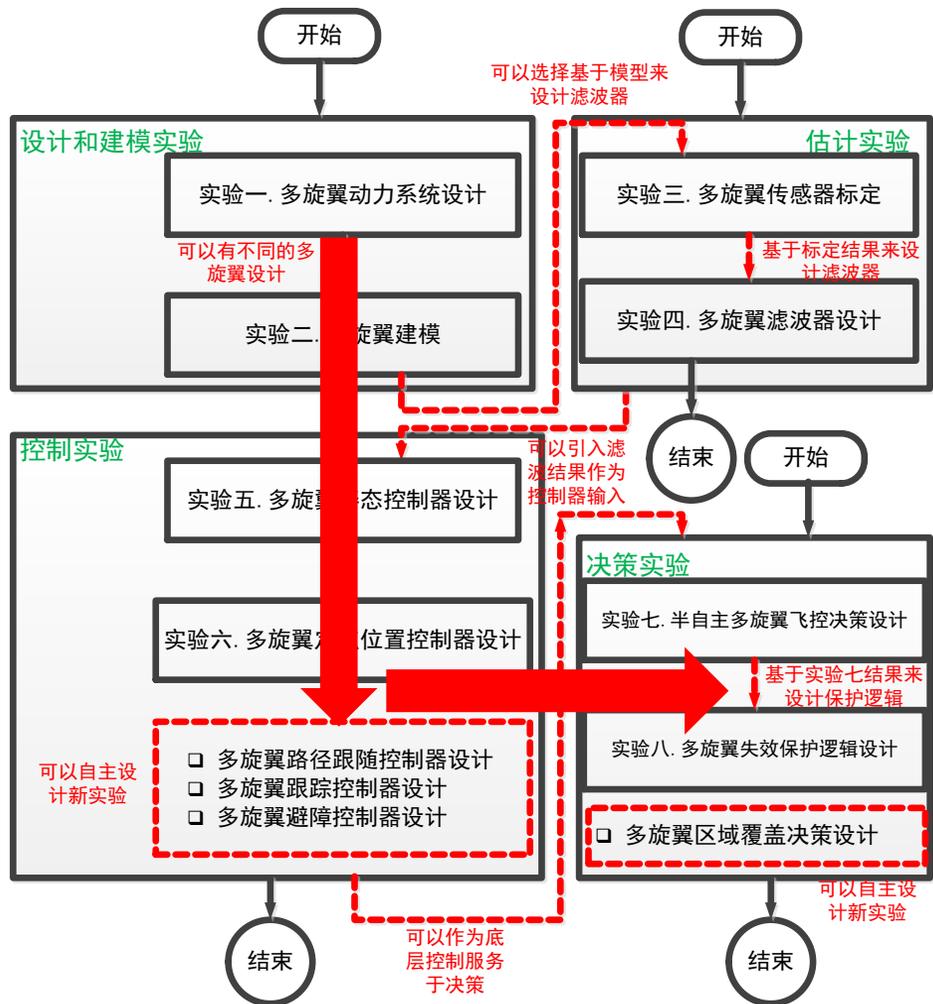
进阶实验内容和框架设计

- 动力系统设计
- 动态建模
- 传感器标定
- 滤波器设计
- 姿态控制器设计
- 定点位置控制器设计
- 半自主控制模式设计
- 失效保护逻辑设计





课程设置



■ 本平台提供的例程可以保证每个实验或者每个板块的实验可以被**单独完成**

■ 为了使任务目标有差异化，我们课程可以按照一种递进的结构完成。递进路线可以分为：

(1) 设计和建模实验 -> 控制实验

(2) 设计和建模实验 -> 控制实验-> 决策实验

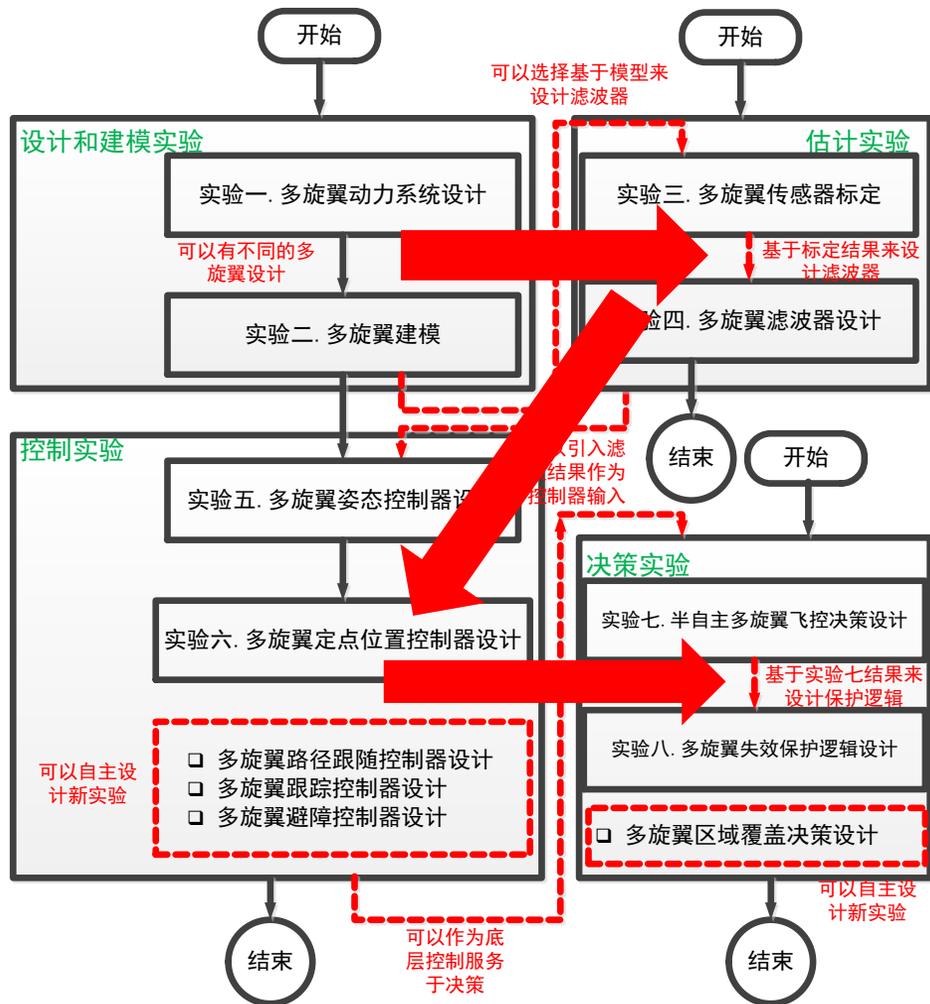
(3) 设计和建模实验 -> 估计实验-> 控制实验-> 决策实验

■ 需要**设计不同的飞行器**，这样将会使**模型各不相同**，而且**建模方法也可以各不相同**，**控制实验的设计也各不相同**。

■ 教师还可以自行**增加附加实验**



课程设置



■ 本平台提供的例程可以保证每个实验或者每个板块的实验可以被**单独完成**

■ 为了使任务目标有差异化，我们课程可以按照一种递进的结构完成。递进路线可以分为：

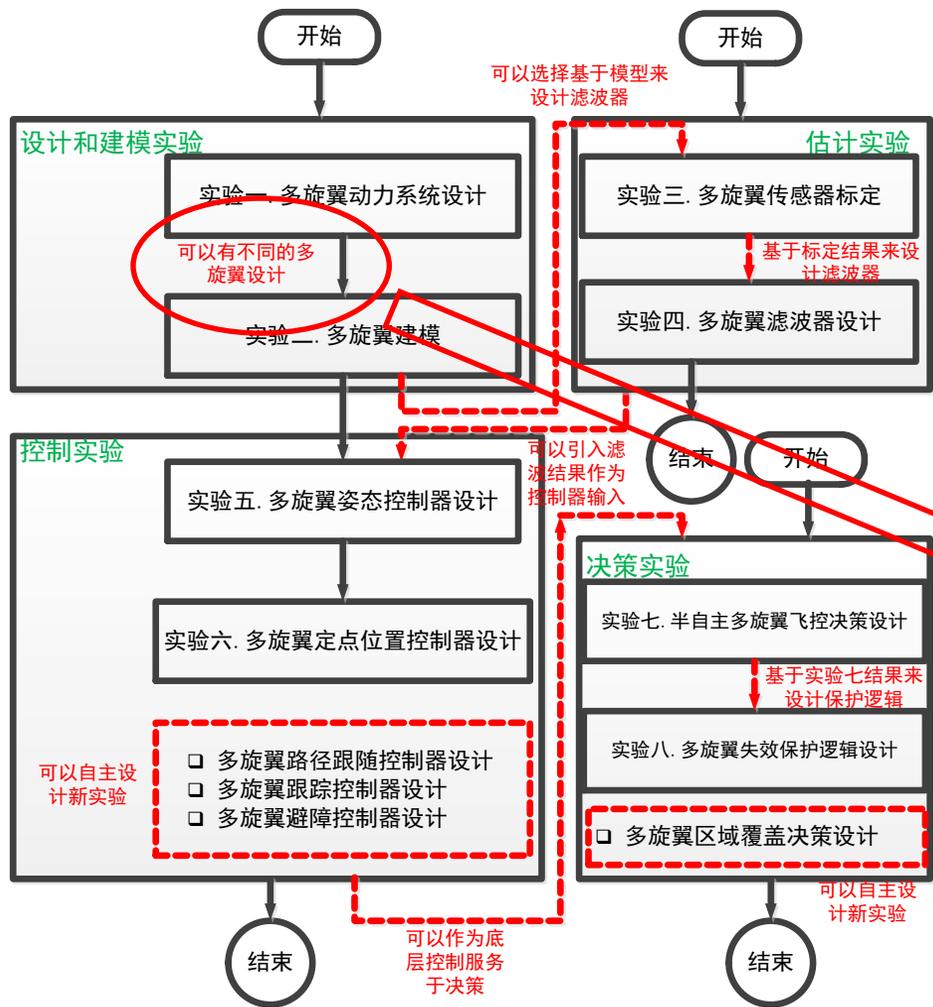
(1) 设计和建模实验 -> 控制实验

(2) 设计和建模实验 -> 控制实验-> 决策实验

(3) 设计和建模实验 -> 估计实验-> 控制实验-> 决策实验

■ 需要**设计不同的飞行器**，这样将会使**模型各不相同**，而且**建模方法也可以各不相同**，控制实验的设计也各不相同。

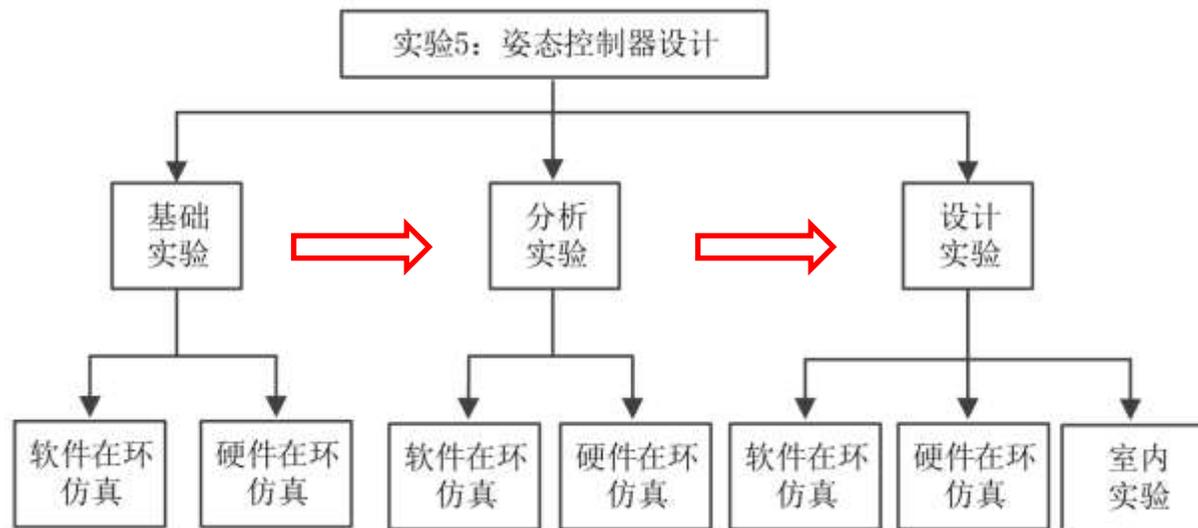
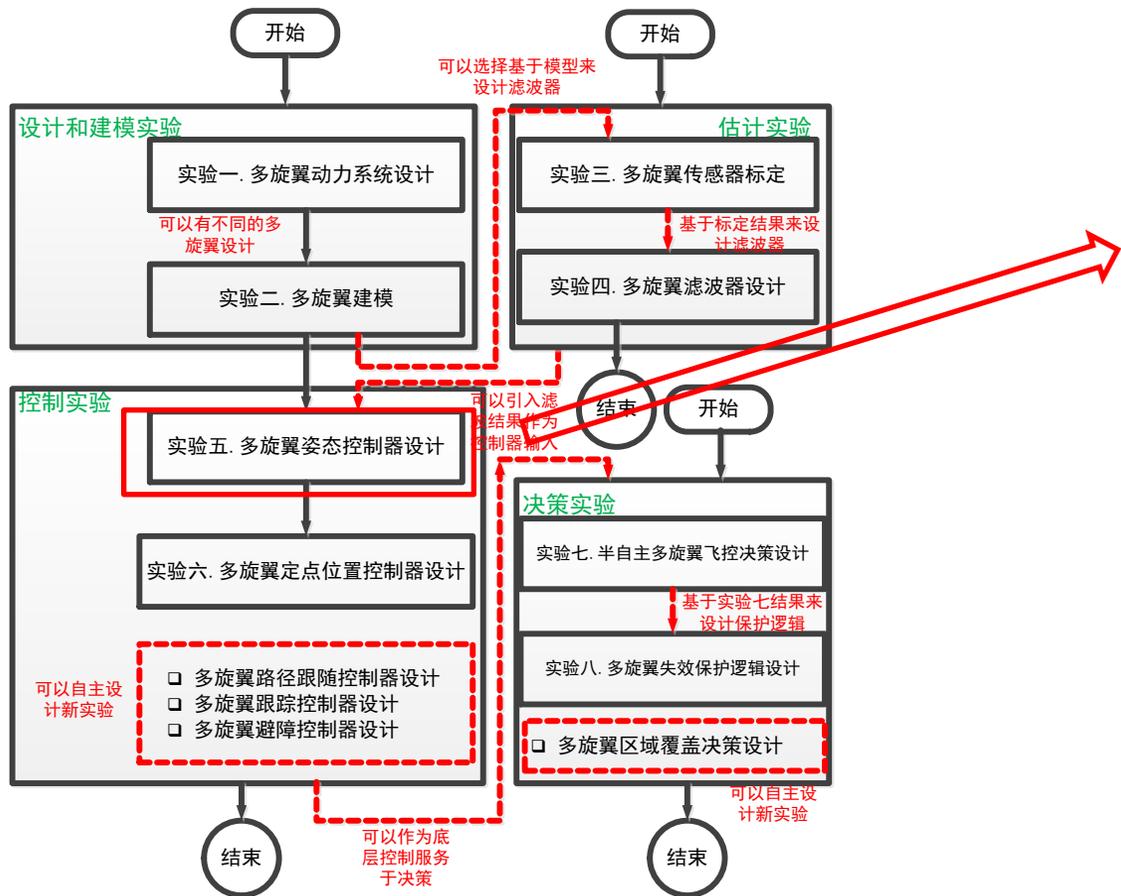
■ 教师还可以自行**增加附加实验**





课程设置

实验步骤设计





课程设置

□ 实验步骤设计

基础实验

打开例程，阅读并运行程序代码，然后观察并记录分析数据。

分析实验

指导读者修改例程，运行修改后的程序并收集和分析数据。

设计实验

在上述两个实验的基础上，针对给定的任务，进行独立的设计。



□ 实验步骤设计

9.2.1 实验目标

(1) 已知

- 1) 硬件: Pixhawk 自驾仪系统, 多旋翼硬件系统;
- 2) 软件: MATLAB2017b 及以上版本, 基于 Simulink 的控制器设计与仿真平台。

(2) 目标

- 1) 复现四旋翼飞行器的 Simulink 仿真, 分析控制分配器的作用;
- 2) 记录姿态的阶跃响应, 并对开环姿态控制系统进行扫频以绘制 Bode 图, 分析闭环姿态控制系统的稳定裕度;
- 3) 完成四旋翼硬件在环仿真。

• 基础实验



□ 实验步骤设计

• 分析实验

(2) 目标

- 1) 调节PID控制器的相关参数以改善控制性能并记录超调量和调节时间，试得到一组恰当的参数；
- 2) 使用调试后的参数后，对系统进行扫频以绘制Bode图，观察系统幅频响应、相频响应曲线，分析其稳定裕度。

• 设计实验

(2) 目标

- 1) 建立姿态控制通道的传递函数模型，设计校正控制器，使得姿态角速度环稳态误差 $e_{r_{ss}} \leq 0.001$ ，相位裕度 $>65^\circ$ ，截至频率 $>10\text{rad/s}$ 。姿态角度环截至频率 $>5\text{rad/s}$ ，相位裕度 $>60^\circ$ ；
- 2) 使用自己设计的控制器进行软件在环仿真实验和硬件在环仿真实验；
- 3) 使用自己设计的控制器进行实飞实验。



课程设置

所有代码均在实际飞行测试中实施



手动模式切换



失效保护



课程设置

表. 实验类型、目标和内容

目标	基础实验	分析实验	设计实验
熟悉开发平台	✓	✓	✓
熟悉分析过程	×	✓	✓
熟悉设计方法	×	×	✓
进行软件在环仿真	✓	✓	✓
进行硬件在环仿真	✓	✓	✓
实际实验测试	×	×	✓

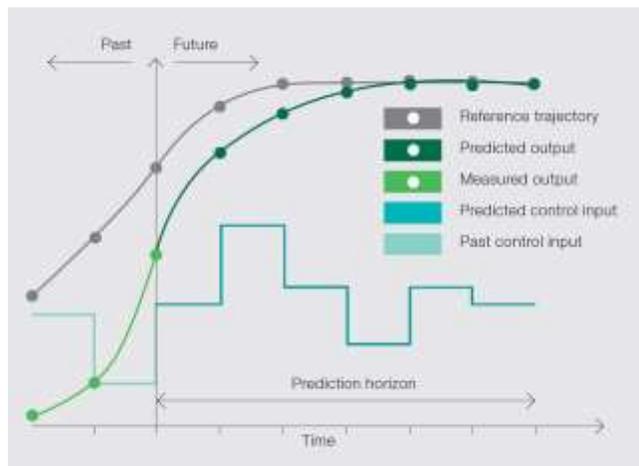
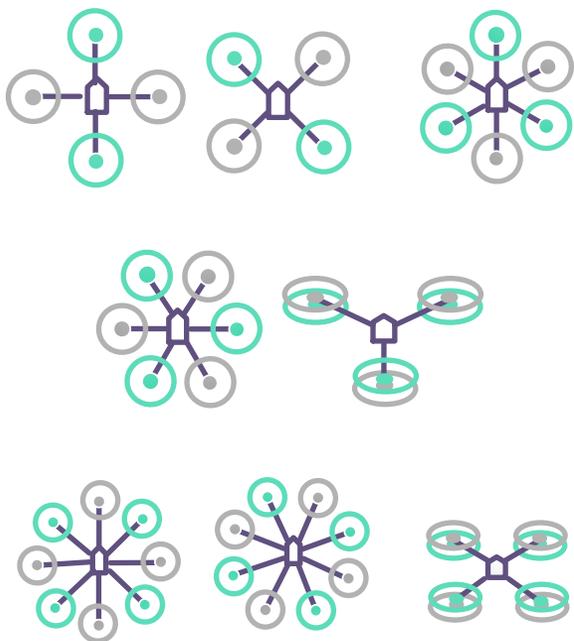


课程设置

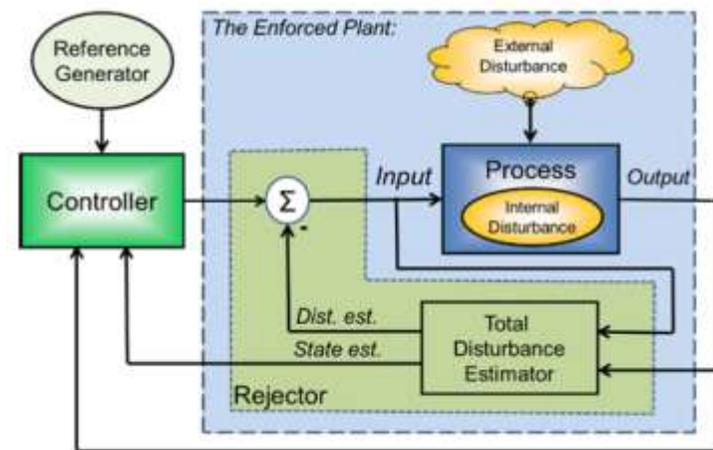
□ 教学设计

□ 修改动力系统设计实验和建模实验的目标

□ 增加新实验



预测控制



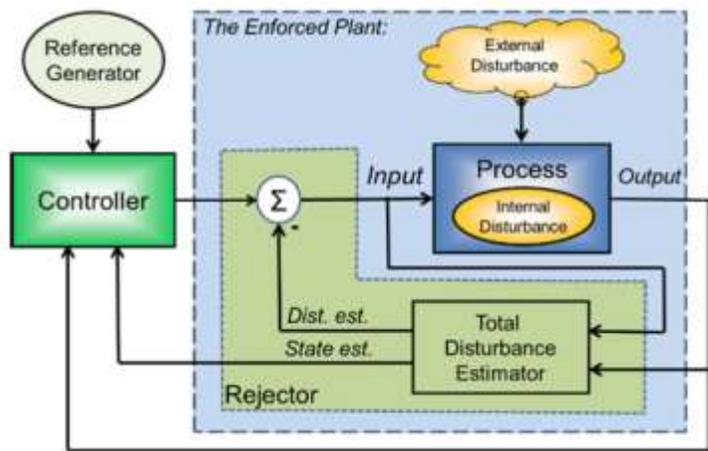
自抗扰控制



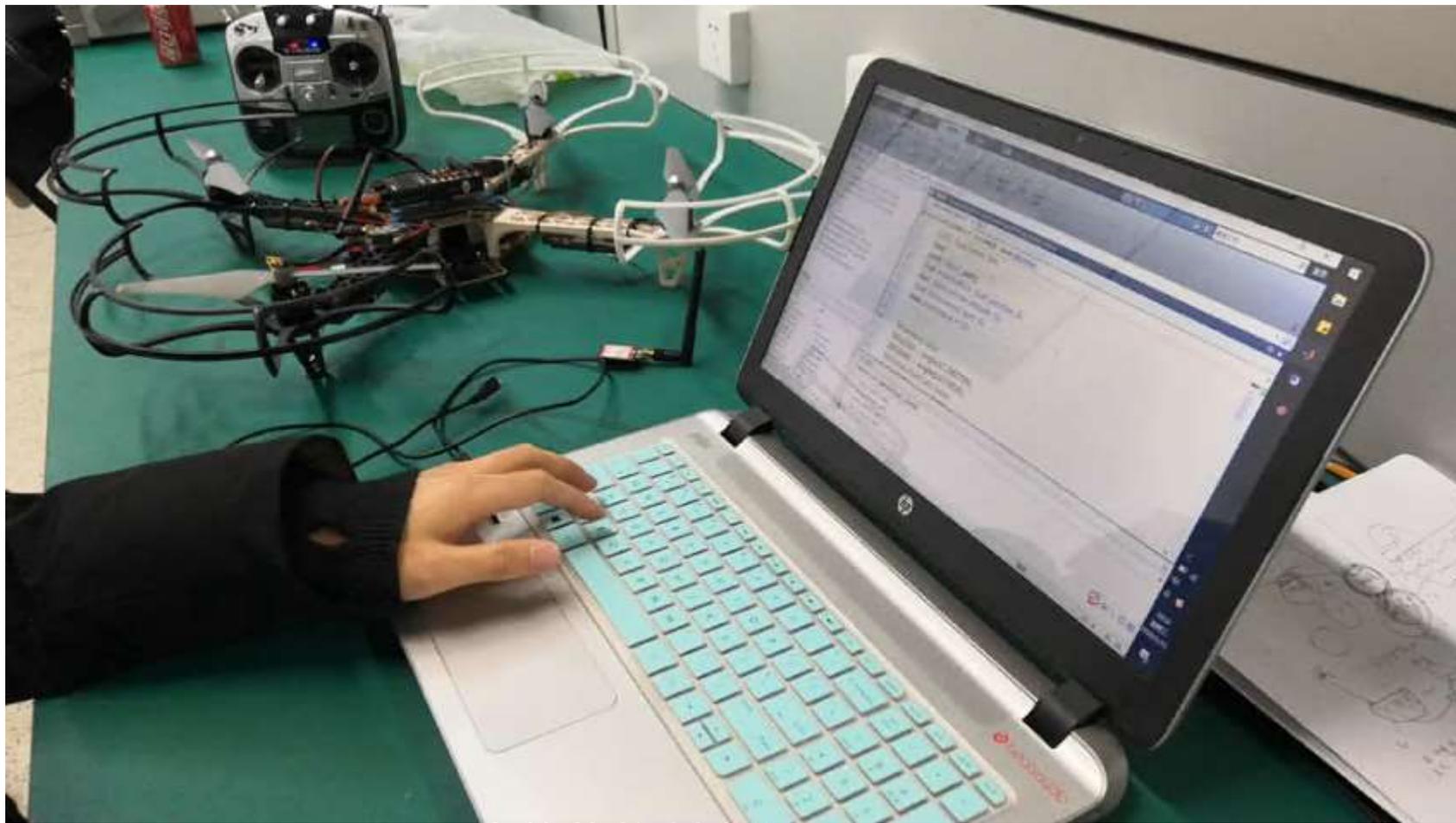
课程设置

□ 教学设计

□ 增加新实验



自抗扰控制



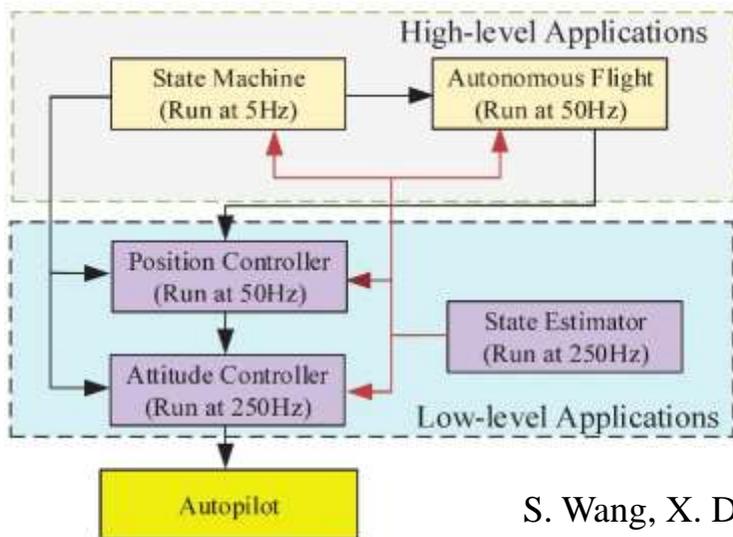
自抗扰控制实际飞行



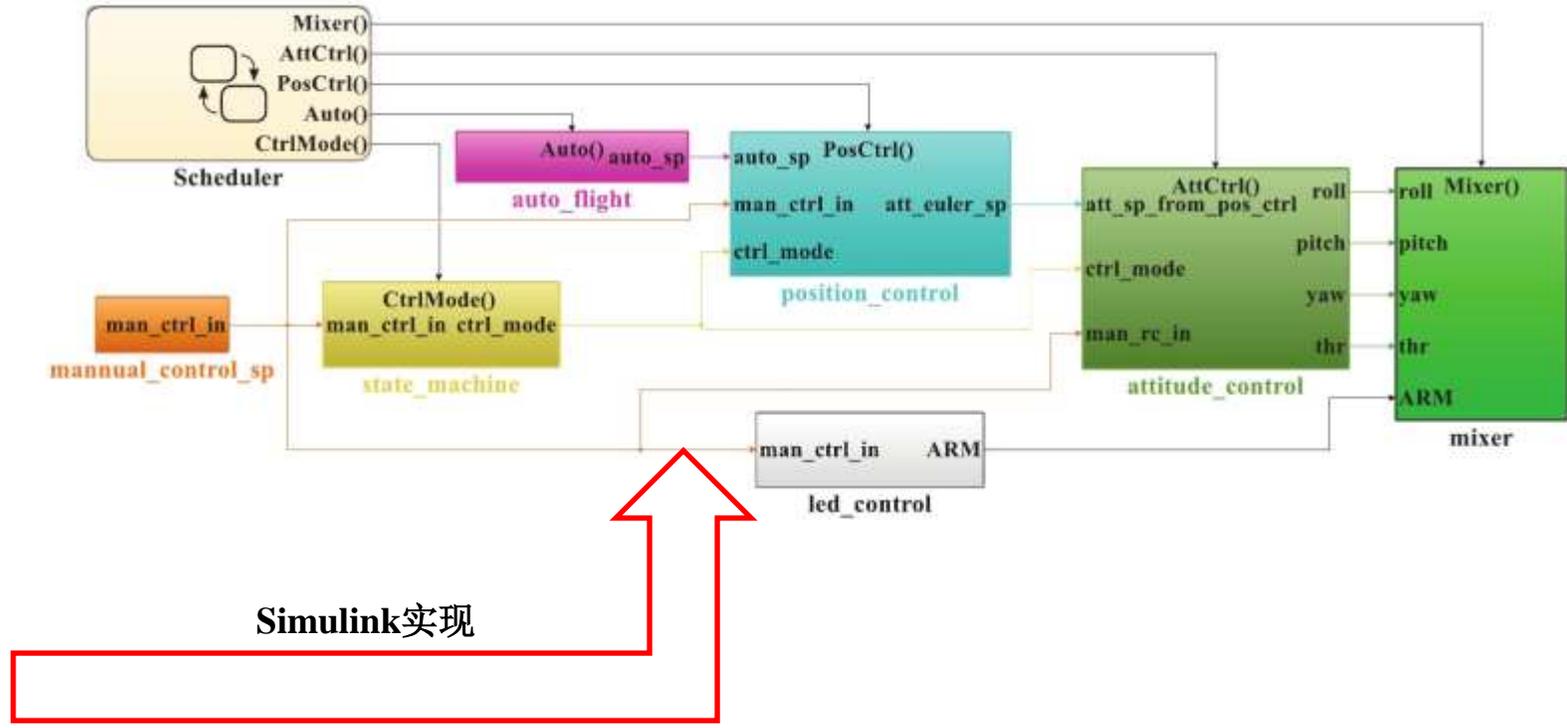
如何开发自驾仪系统

□ 设置时钟

飞控底层控制逻辑采用分层控制，
为每一个层级设置准确的运行频率。



```
Scheduler
on every(1,tick):send(AttCtrl);
on every(1,tick):send(Mixer);
on every(5,tick):send(PosCtrl);
on every(5,tick):send(Auto);
on every(50,tick):send(CtrlMode);
```



Simulink实现

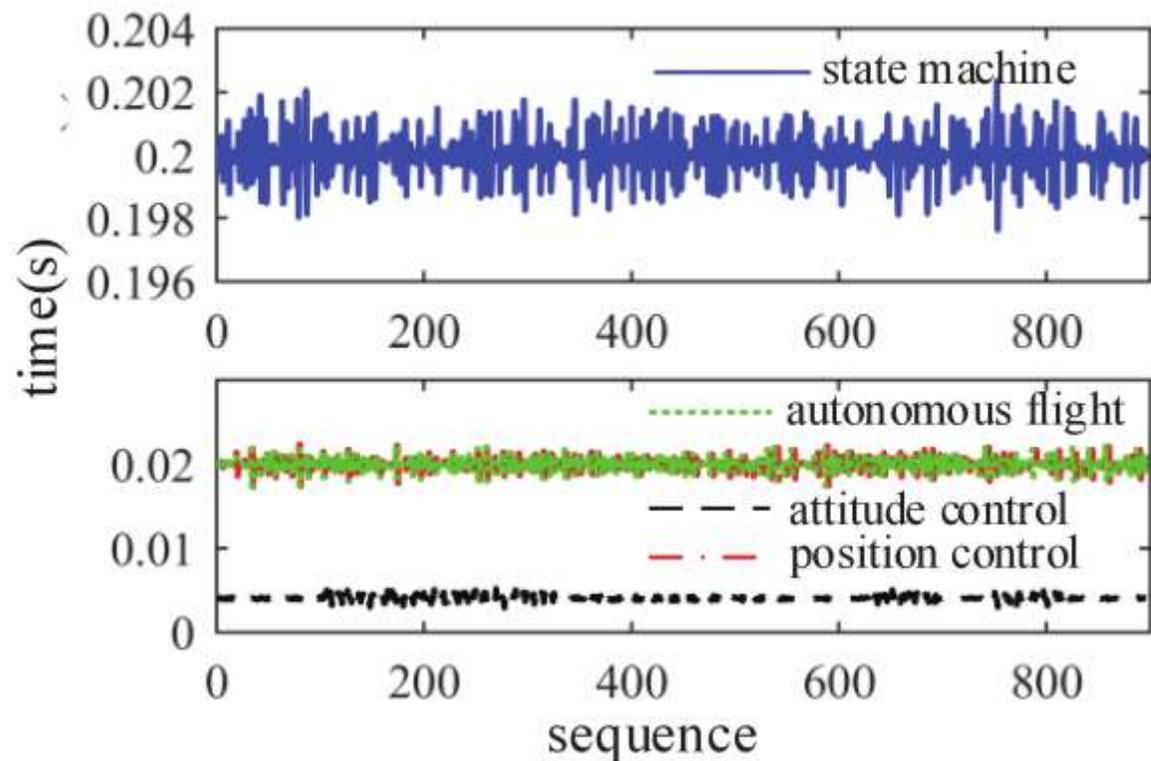
S. Wang, X. Dai, and Q. Quan, "A Rapid Multicopter Development Platform for Education and Research based on Pixhawk and MATLAB," in 2020 IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2020.



如何开发自驾仪系统

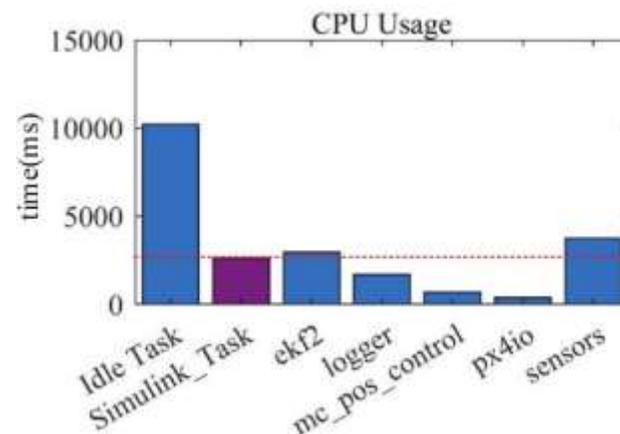
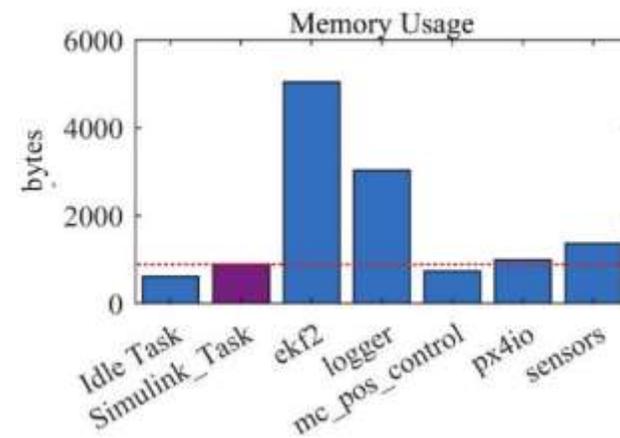
	指定执行周期	实际执行周期	统计频率
状态机	0.2s	0.2 ± 0.002 s	5Hz
姿态控制器	0.004s	0.004 ± 0.001 s	249Hz
位置控制器	0.02s	0.02 ± 0.002 s	49Hz
自主飞行	0.02s	0.02 ± 0.002 s	49Hz

□ 设置时钟：性能



周期执行准确

内存和CPU的使用较低

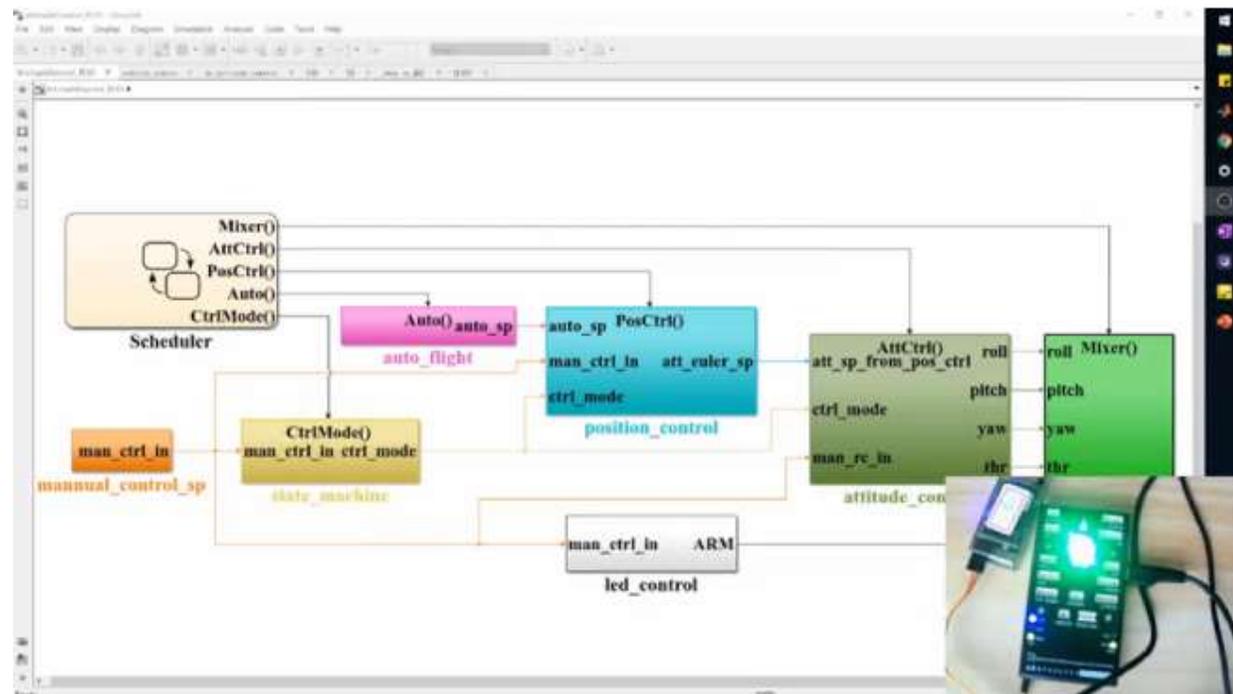
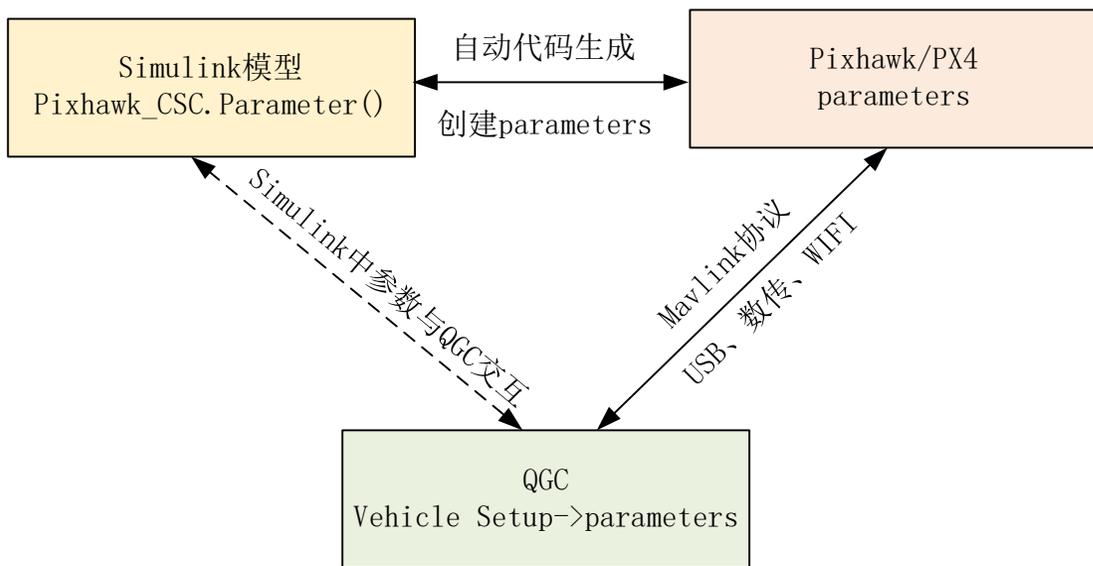




如何开发自驾仪系统

□ 地面站交互

- **在线参数整定**。使用者可以通过QGC地面站在线修改Simulink模型中的参数，无需每次修改参数后就重新编译并烧录程序，提高程序调试效率。

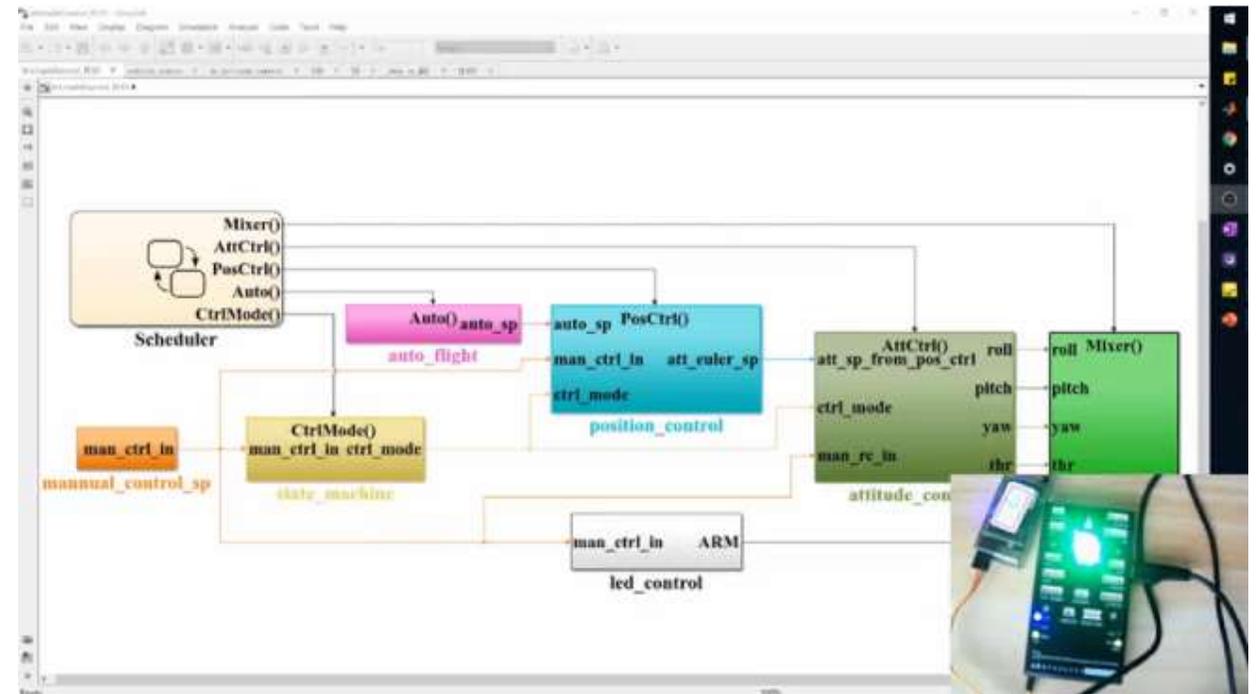
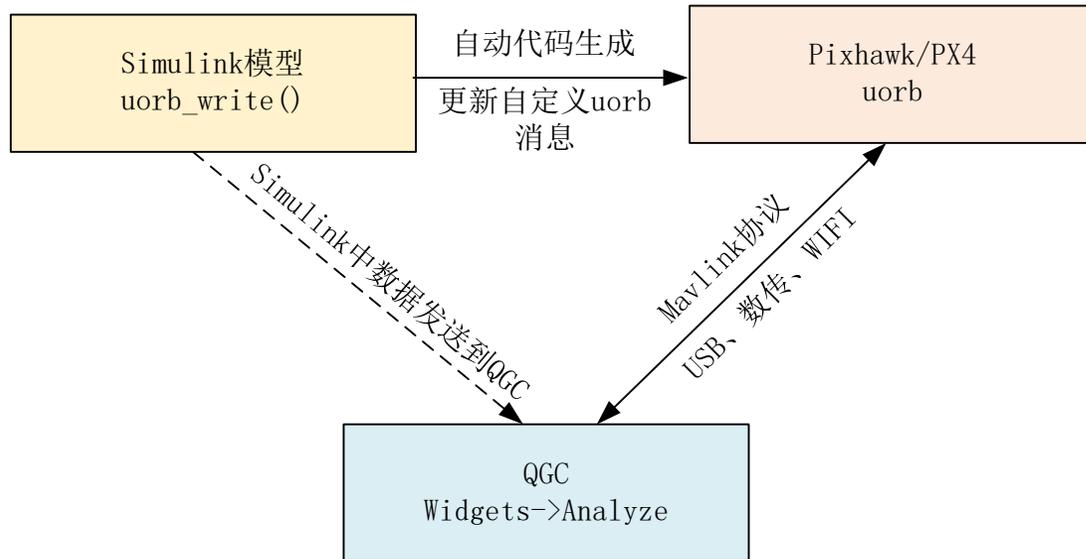




如何开发自驾仪系统

□ 地面站交互

- **数据实时显示**。如果使用者需要在飞行器飞行过程中实时观察飞行器状态或者控制器的中间参数，也可以很方便地在Simulink模型中添加实时数据观测模块，并在QGC中观测数据。





总结

No.	问题
Q1	给定负载重量和悬停时间要求，如何设计多旋翼动力系统？
Q2	给定一个Pixhawk自驾仪，如何校准其加速度计和磁力计，以及如何设计滤波器来估计状态？
Q3	基于设计的多旋翼动力系统和机架飞机生产系统和机身布局，如何建立多旋翼动态模型？
Q4	基于建立的动态模型，如何设计电机控制器，控制分配器和姿态控制器？
Q5	基于设计的姿态控制器，如何设计定点位置控制器？
Q6	基于设计的姿态控制器和定点位置控制器，如何设计半自主模式控制器？
Q7	基于半自主模式控制器，如何为设计的多旋翼设计失效保护逻辑？
Q8	给定一个算法，如何基于模型的设计来实现它？
Q9	如何基于平台开发新功能，例如健康评估或基于视觉的自主飞行？
Q10	如何高效地组织一群工程师进行飞控开发？



谢谢!