



多旋翼飞行器设计与控制 实践

第一讲 课程介绍

全权 副教授

qq_buaa@buaa.edu.cn

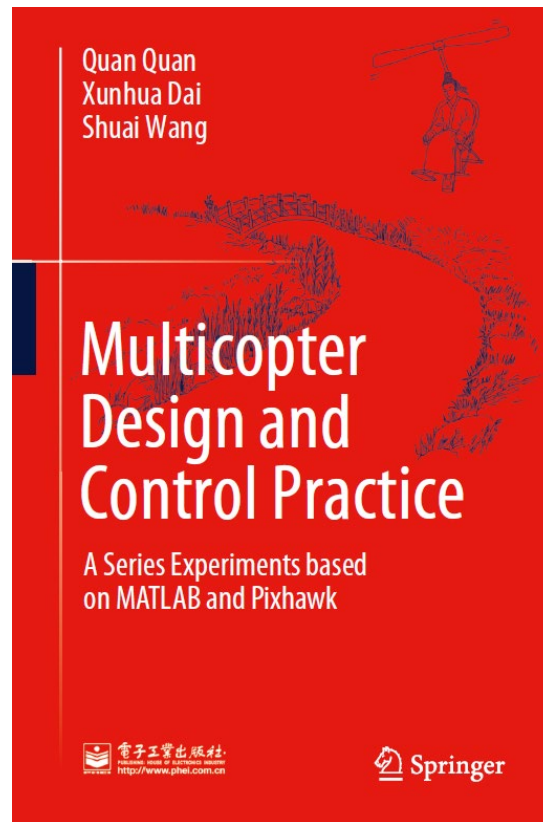
自动化科学与电气工程学院

北京航空航天大学



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



英文已经出版



中文即将出版（6月中下旬）





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

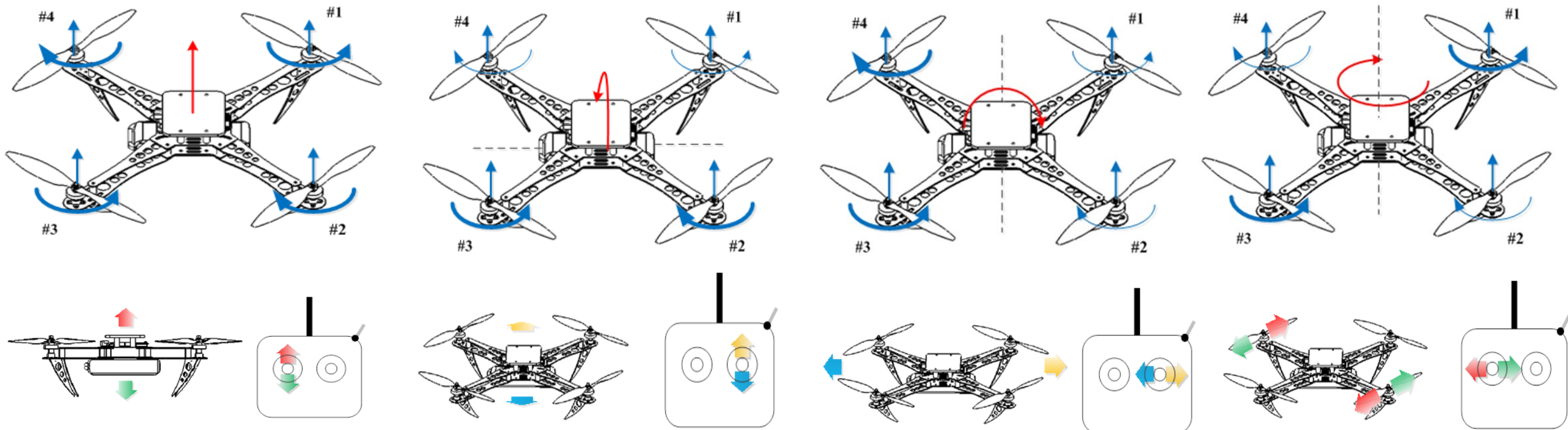
缺点：载重和续航时间都更差





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

简单!





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。

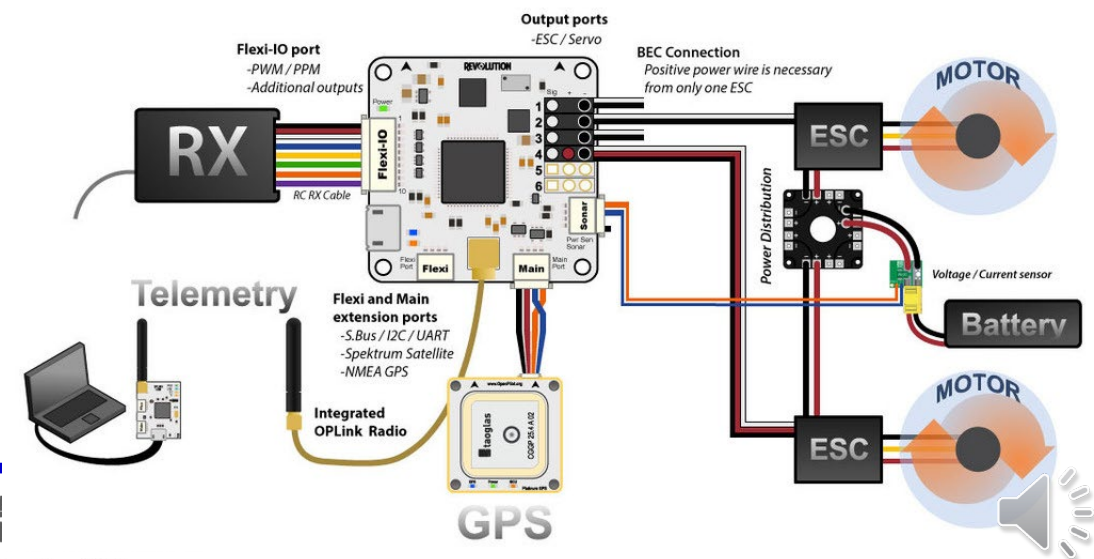
机架



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。

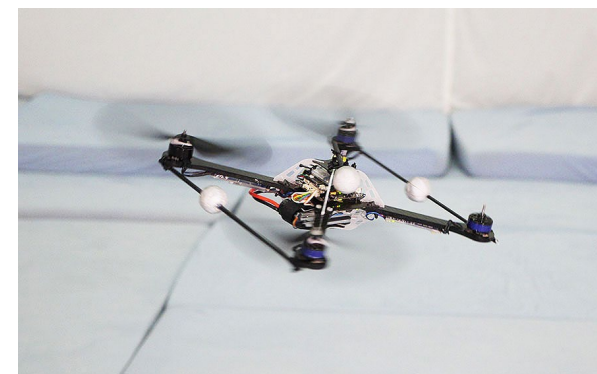
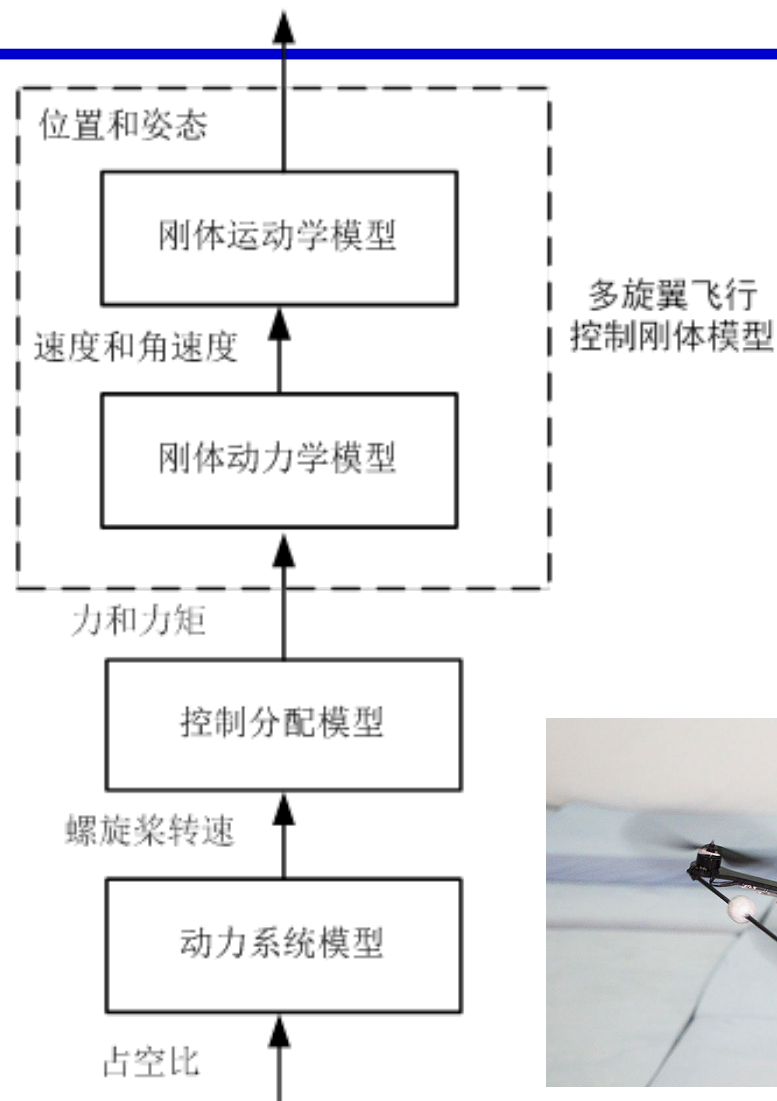




多旋翼

□ 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

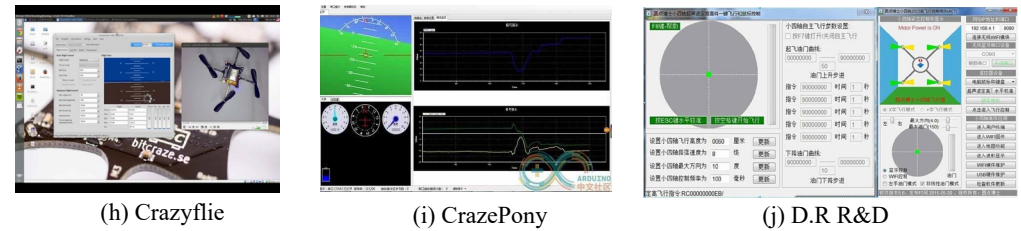
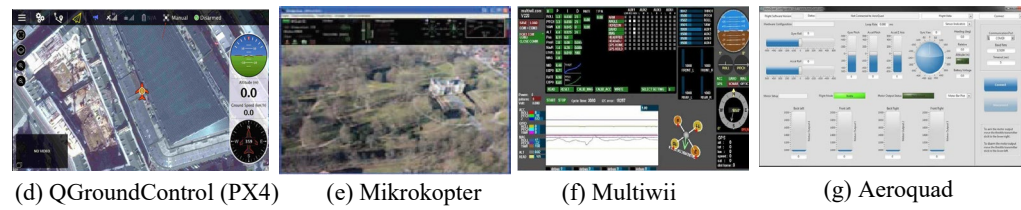
多旋翼涉及的学科

- 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 mconf
/bin/mkdir -p '/home/reclone/nuttx-git/buildroot/build_arm_hf/staging_dir/bin'
/bin/bash ../libtool --mode=install /usr/bin/install -c mconf '/home/reclone/nuttx-git/buildroot/build_arm_hf/staging_dir/bin/.kconfig-mconf'
libtool: install: /usr/bin/install -c mconf /home/reclone/nuttx-git/buildroot/build_arm_hf/staging_dir/bin/.kconfig-mconf
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
arm-elf-addr2line  arm-elf-gdb  arm-nuttx-eabi-c++  arm-nuttx-eabi-ld.bfd
arm-elf-ar  arm-elf-gprof  arm-nuttx-eabi-cm  arm-nuttx-eabi-nm
arm-elf-as  arm-elf-ld  arm-nuttx-eabi-cppfilt  arm-nuttx-eabi-obcopy
arm-elf-c++  arm-elf-ld.bfd  arm-nuttx-eabi-cpp  arm-nuttx-eabi-obdump
arm-elf-cc  arm-elf-nm  arm-nuttx-eabi-elfedit  arm-nuttx-eabi-ranlib
arm-elf-cppfilt  arm-elf-obcopy  arm-nuttx-eabi-g++  arm-nuttx-eabi-readelf
arm-elf-cpp  arm-elf-obdump  arm-nuttx-eabi-gcc  arm-nuttx-eabi-size
arm-elf-elfedit  arm-elf-ranlib  arm-nuttx-eabi-gcc-4.9.3  arm-nuttx-eabi-strings
arm-elf-elfedit  arm-elf-readelf  arm-nuttx-eabi-gcc-ar  arm-nuttx-eabi-strings

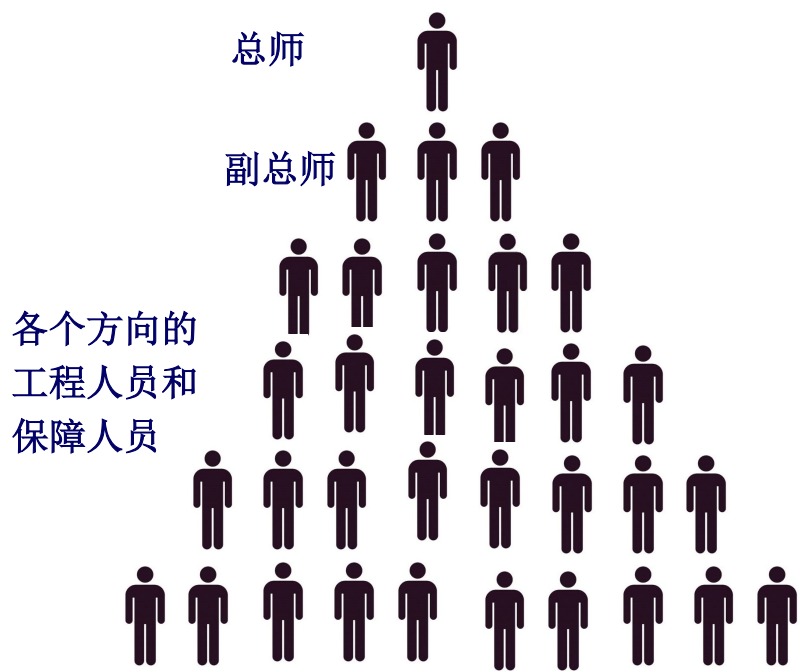
```





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

□ 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
-



首页 > 全部课程 > 工学



多旋翼飞行器设计与控制

第2次开课 ^

第1次开课 9月01日 ~ 2019年11月30日

第2次开课

已有934人参加

立即参加





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
-



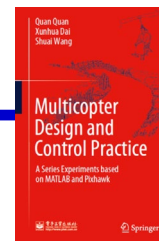
《多旋翼设计与控制》课程

知行合一



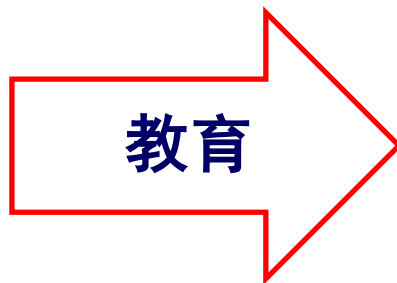
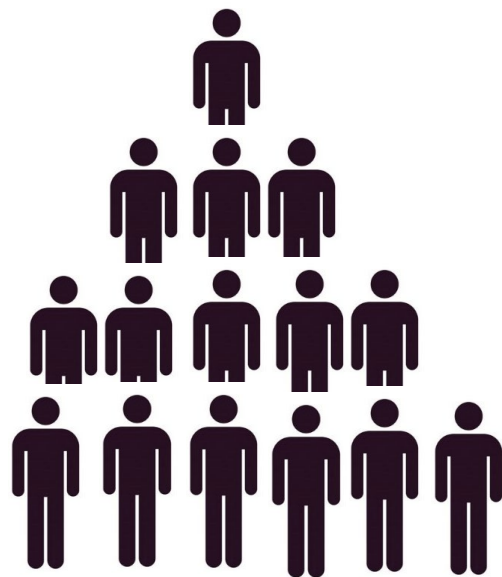
????

如何降低学习门槛？：新工具+新教程





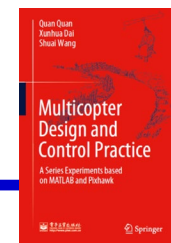
教育的新需求



具备电子工程背景的人

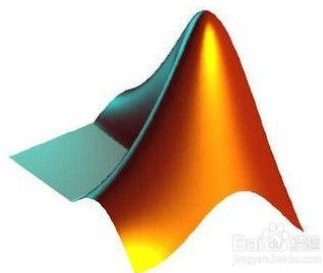
全栈式工程师

如何降低学习门槛? : 新工具+新教程





RflySim平台

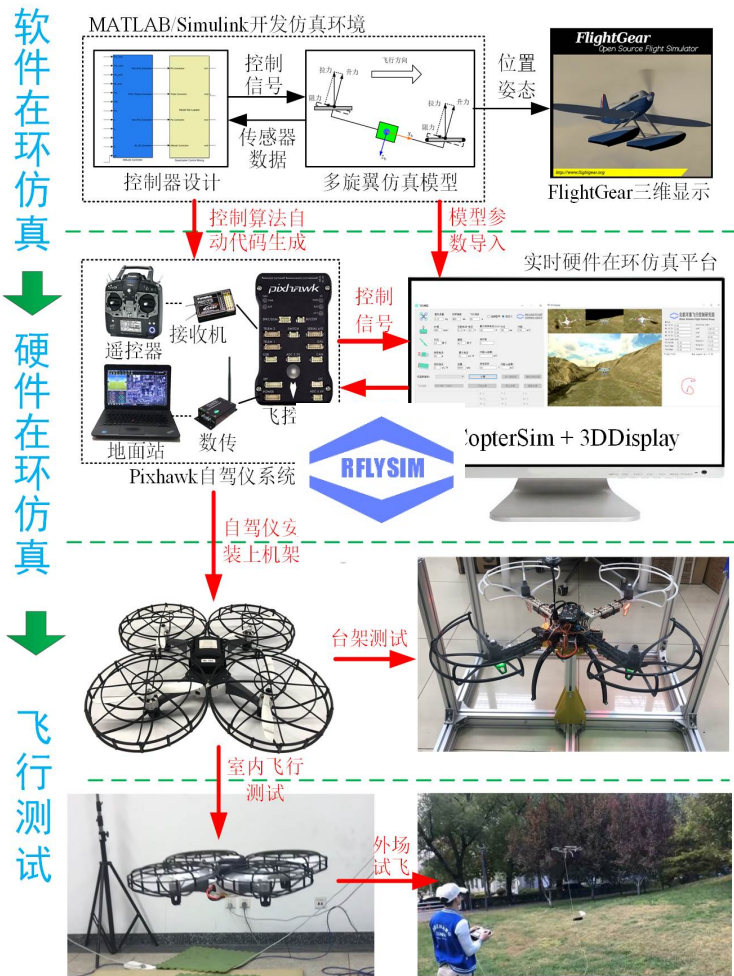


- RflySim是由**北航可靠飞行控制组**发布的生态系统或者说工具链
- 它采用**基于模型设计**（Model-Based Design, MBD）的思想，可用于无人系统的控制和安全测试。因**MATLAB/Simulink**支持MBD的整个设计阶段，我们选择它们作为控制/视觉/集群算法开发的核心编程平台；同时，因**Python**是免费的且有丰富的视觉处理库，我们也支持它作为顶层视觉与集群算法开发





RflySim平台

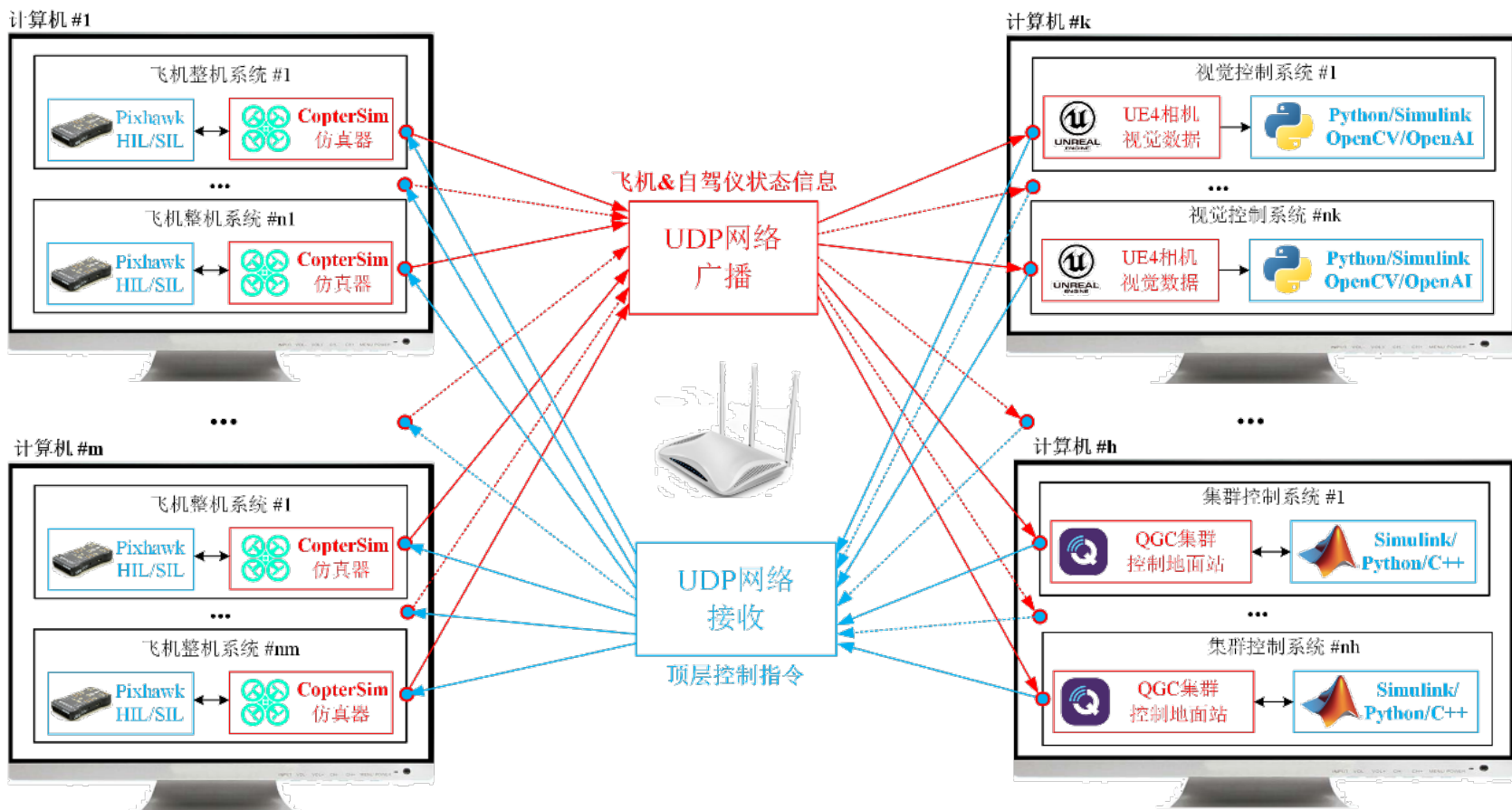


- RflySim核心价值体现在**硬件在环仿真**，包括我们为此专门设计的**CopterSim**、**视景系统插件**、**开发的模型**以及**硬件在环仿真硬件系统设计**等。
- **教育版**的RflySim强调**易用性**，使用个人电脑就可以运行模型，通过串口与控制板进行通信
- **商业版**的RflySim强调**可靠性**，使用FPGA实时仿真器运行模型、传感器芯片，采用高速通信接口与控制板通信。





RflySim平台



■ RflySim教育版核心包括我们为此专门设计的**CopterSim**和**视景系统插件**

- 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



基于PixHawk和MATLAB的多旋翼 控制算法快速平台



北航可靠飞行控制研究组

BUAA Reliable Flight Control Group

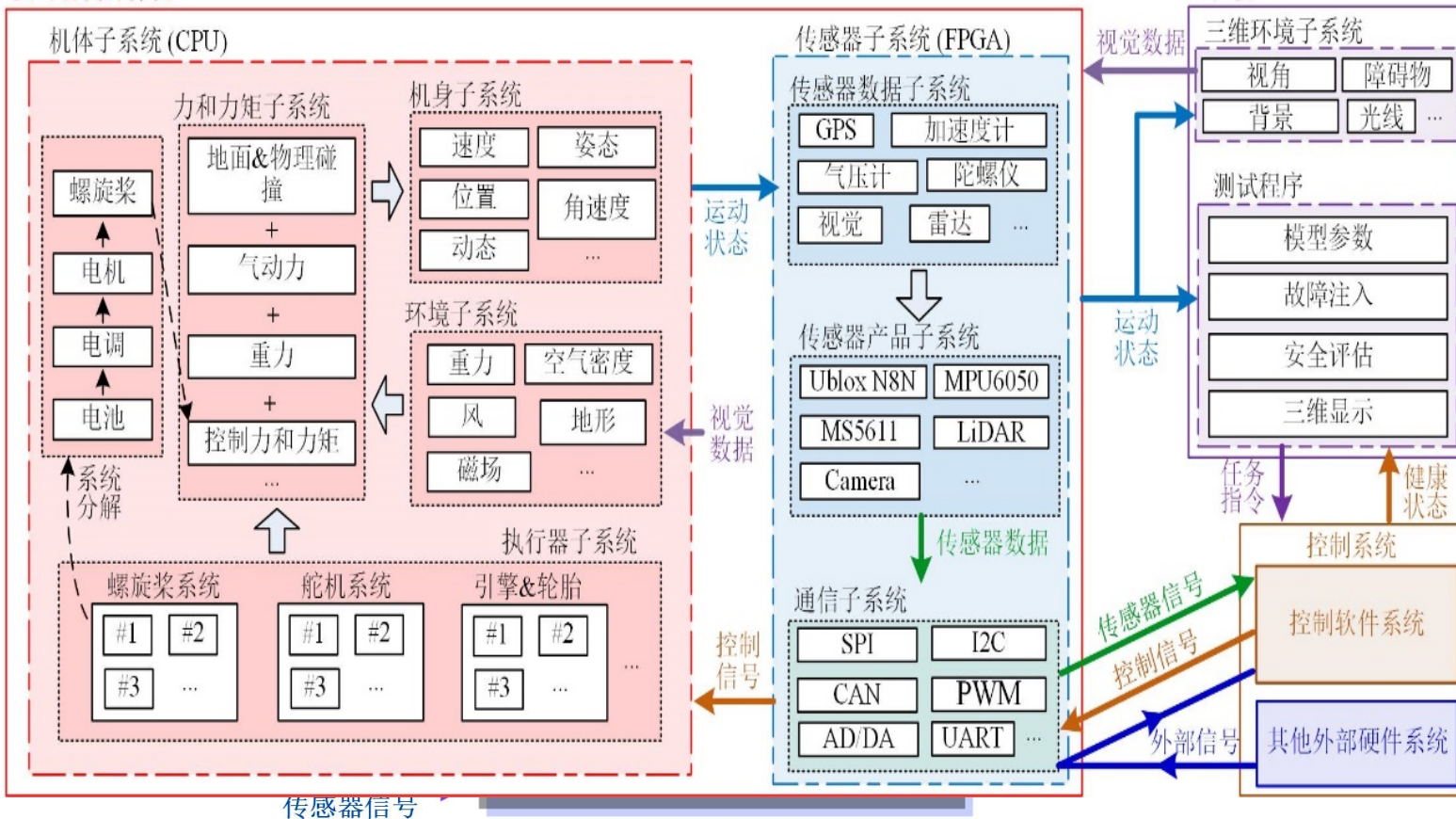




RflySim平台

仿真状态

实时仿真计算机



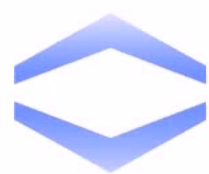
■ RflySim 商业版核心
包括我们为此专门
设计的开发的模型
以及硬件在环仿真
硬件系统设计等

- ① 可拓展性
- ② 实用性
- ③ 标准化
- ④ 自动化



Automatic Safety Testing Platform for UAV Autopilots Based on Real-Time Hardware-in-the-loop Simulation

基于实时硬件在环仿真的无人机自驾仪自动安全测试平台



北航可靠飞行控制研究组

BUAA Reliable Flight Control Group



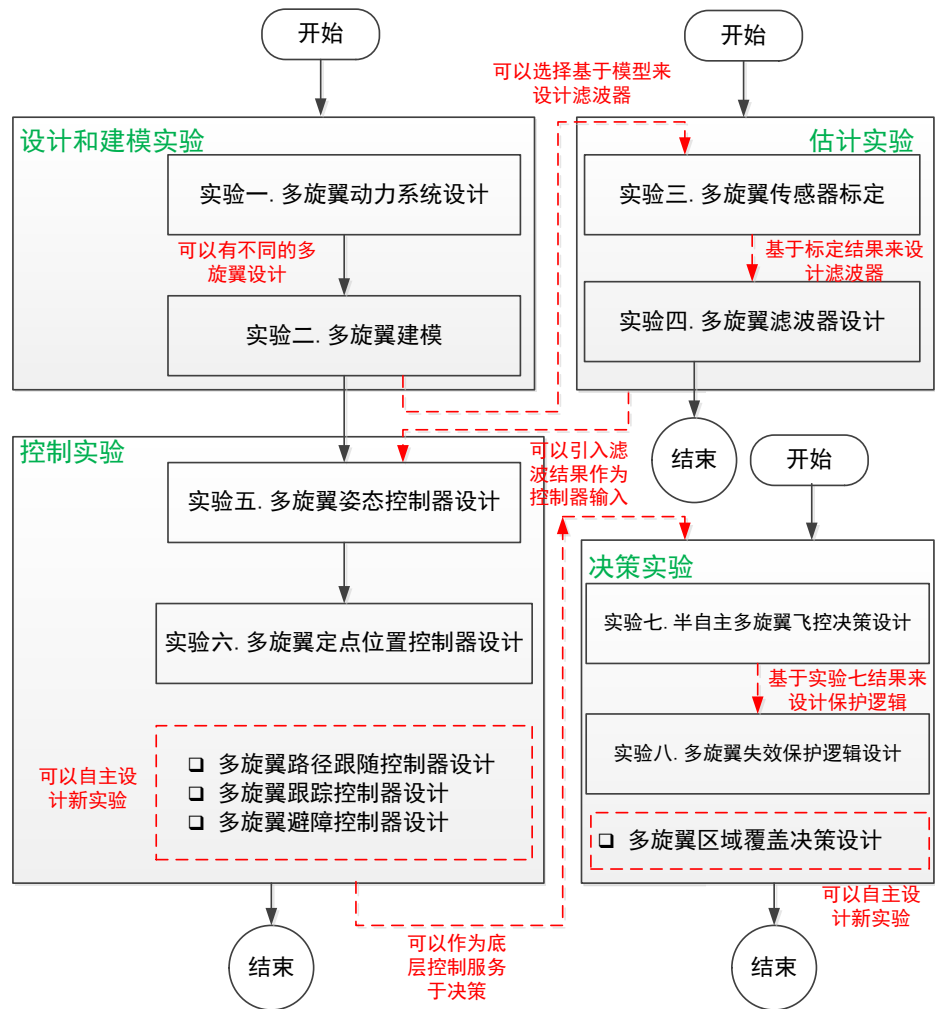


课程设置

□ 实验内容和框架设计

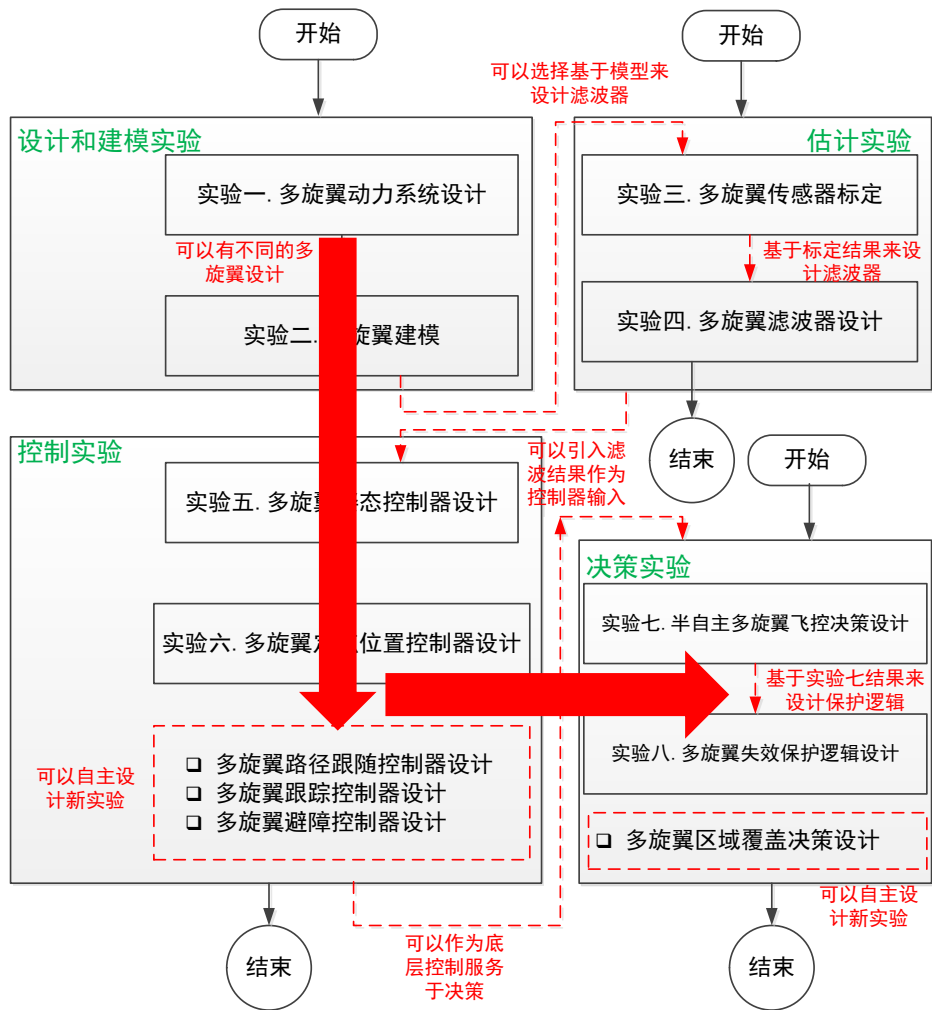
基于RflySim教育版

- 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

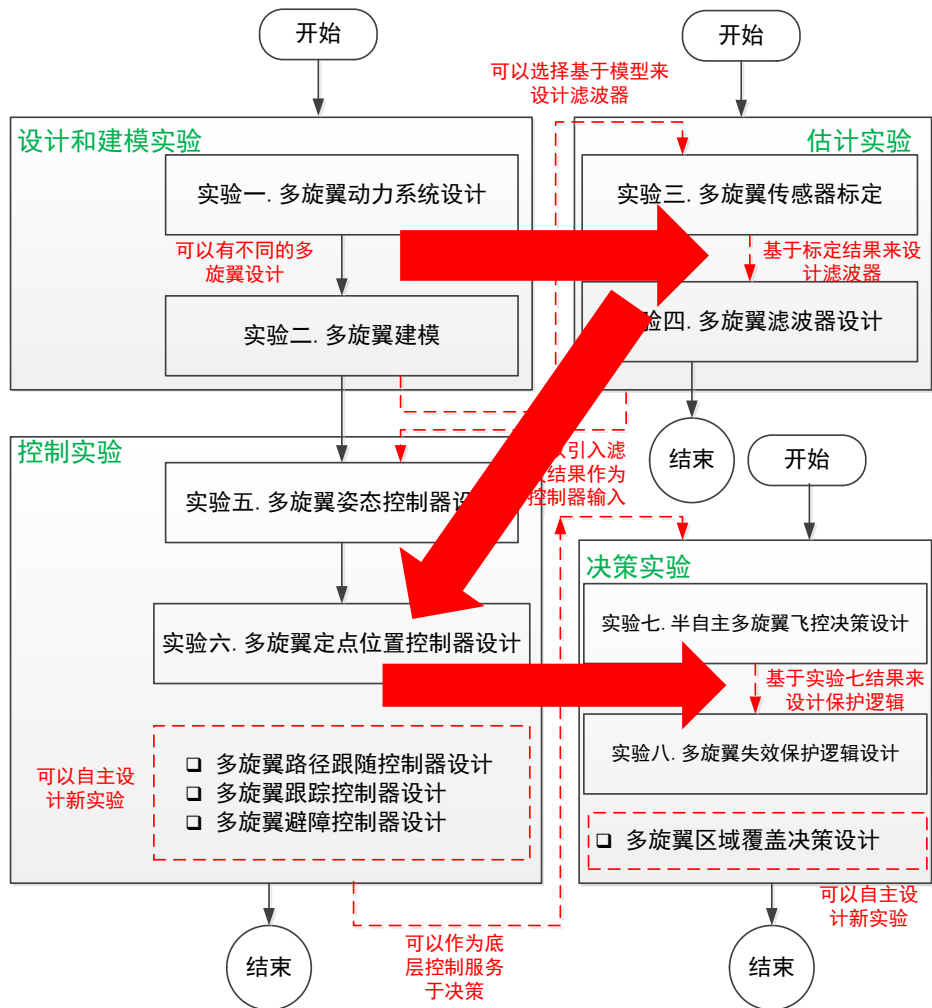
(3) 设计和建模实验 -> 估计实验-> 控制实验-> 决策实验

■ 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**



控制模型 (说明文档)(课件)

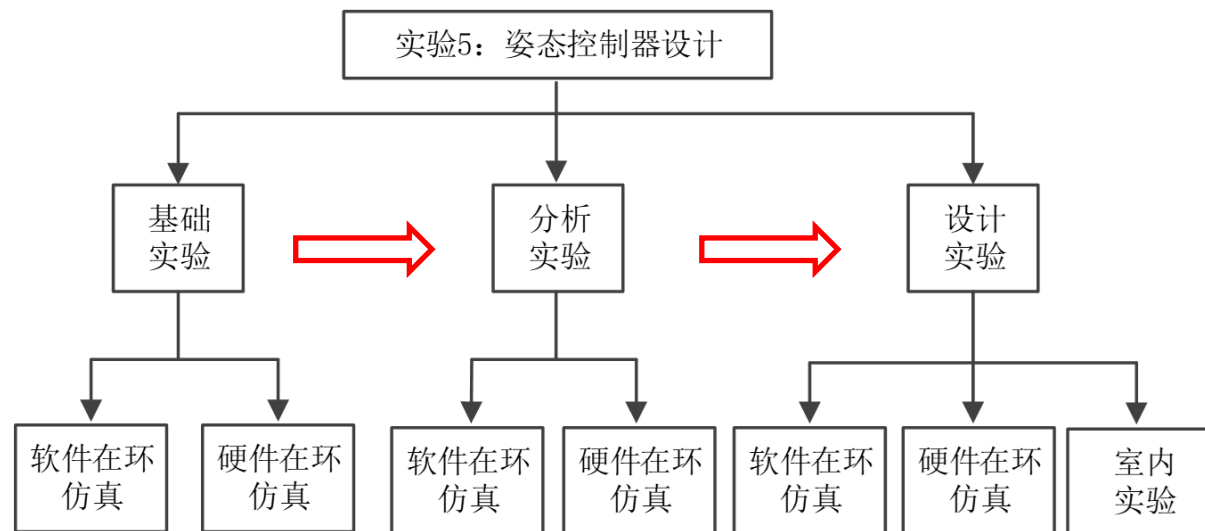
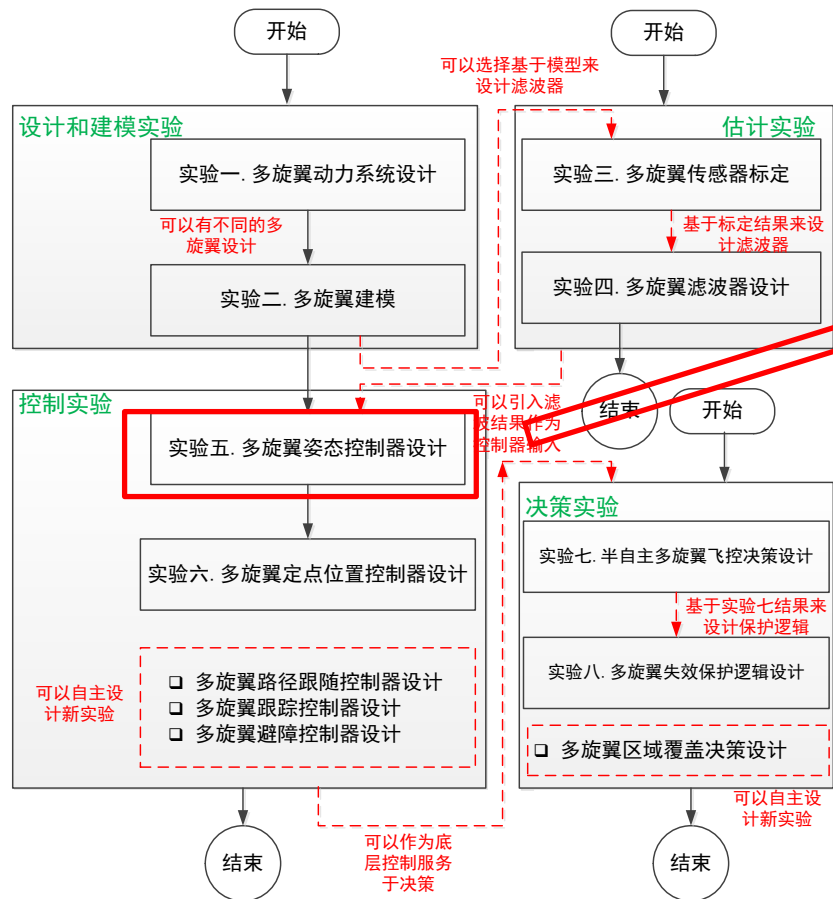
The diagrams show the drone in three coordinate systems: body frame (x_b, y_b, z_b), global frame (x_g, y_g, z_g), and local frame (x_l, y_l, z_l).

多旋翼总质量	: m = 1.5 kg
重力加速度	: g = 9.8 m/s ²
转动惯量矩阵	: J _{xx} = 1.372e-2 kg.m ²
J = diag(J _{xx} , J _{yy} , J _{zz})	: J _{yy} = 1.372e-2 kg.m ²
	: J _{zz} = 2.465e-2 kg.m ²
多旋翼机身半径(1/2轴距)	: d = 0.225 m
螺旋桨推力系数(T _p /ω ²)	: C _T = 1.201e-5 N/(rad/s) ²
螺旋桨力矩系数(M _p /ω ²)	: C _M = 2.100e-7 N.m/(rad/s) ²
油门(σ)到电机稳态转速(ω _{ss})	: C _R = 708.7 rad/s
(ω _{ss} = C _R ² σ + ω _b)	: ω _b = 146.07 rad/s
电机螺旋桨转动惯量	: J _m = 1.16e-4 kg.m ²
电机响应时间常数	: T _m = 0.0673 s
多旋翼空气阻力系数(D/v ²)	: C _d = 0.222 N/(m/s) ²



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。



课程设置

□ 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: MATLAB 2017b 及以上版本, 基于 Simulink 的控制器设计与仿真平台, 硬件在环仿真平台, 实验指导包“e5.1”(<https://flyeval.com/course>)。

(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



课程设置

□ 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 $e_{r_{ss}} \leq 0.01$, 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	×	×	✓

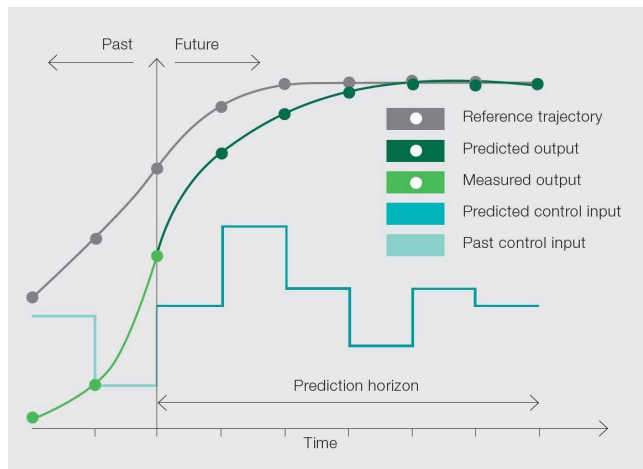
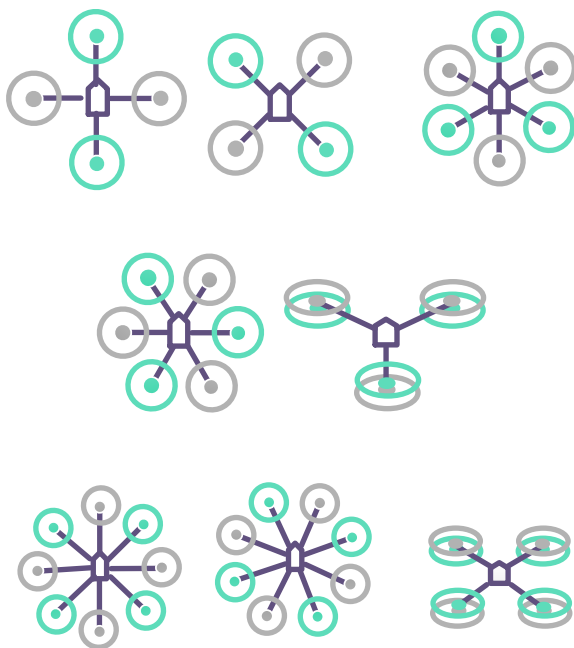


课程设置

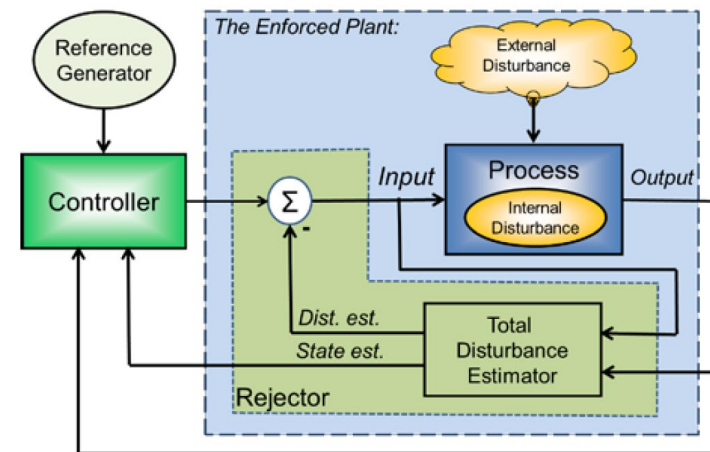
□ 教学设计

□ 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



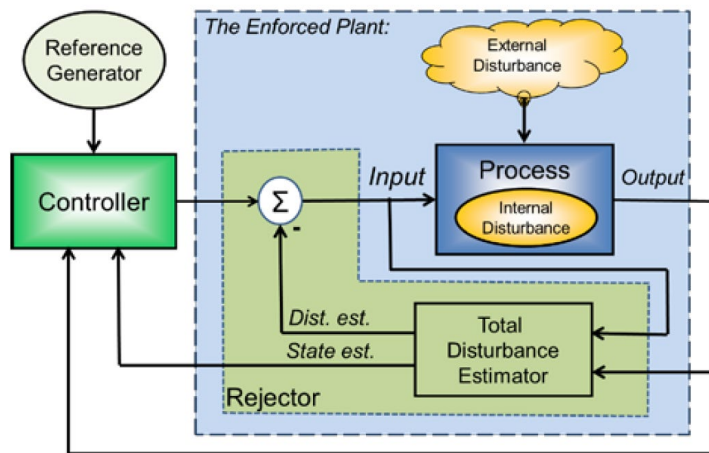
自抗扰控制



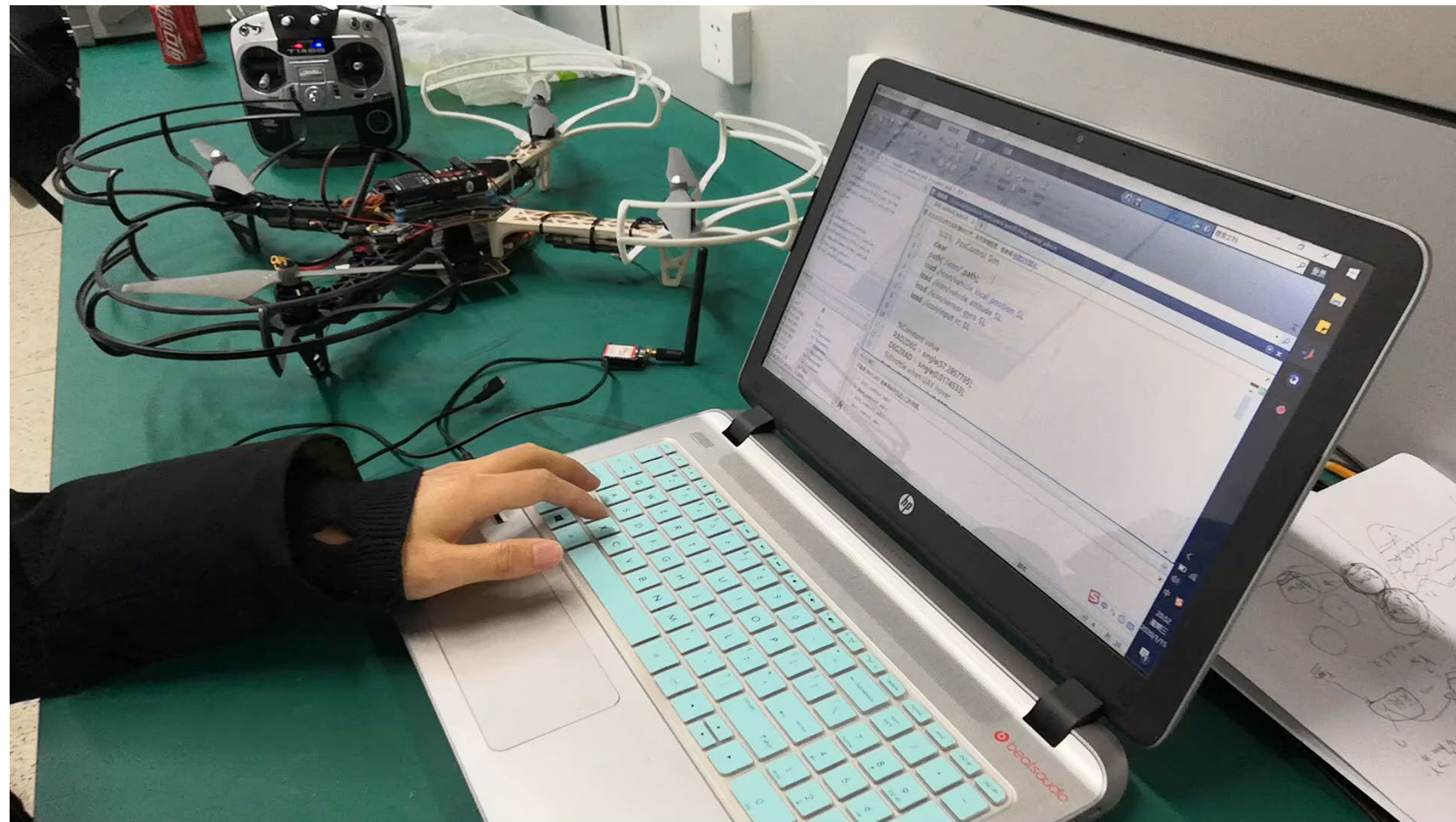
课程设置

□ 教学设计

□ 增加新实验



自抗扰控制



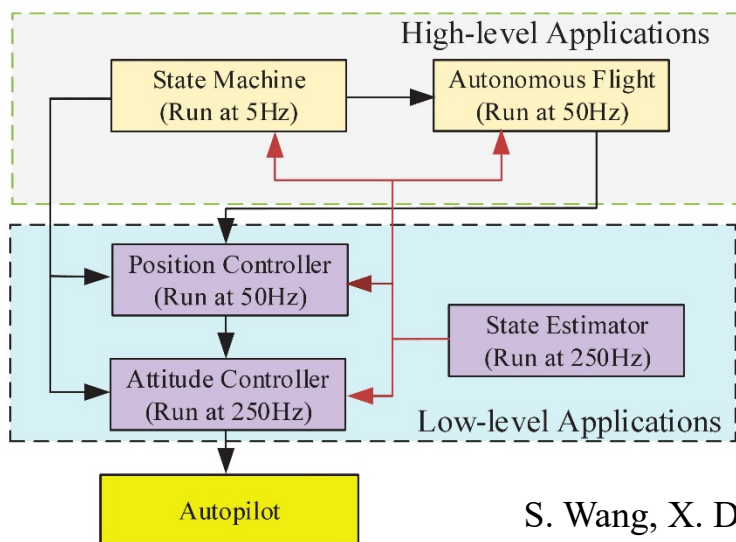
自抗扰控制实际飞行



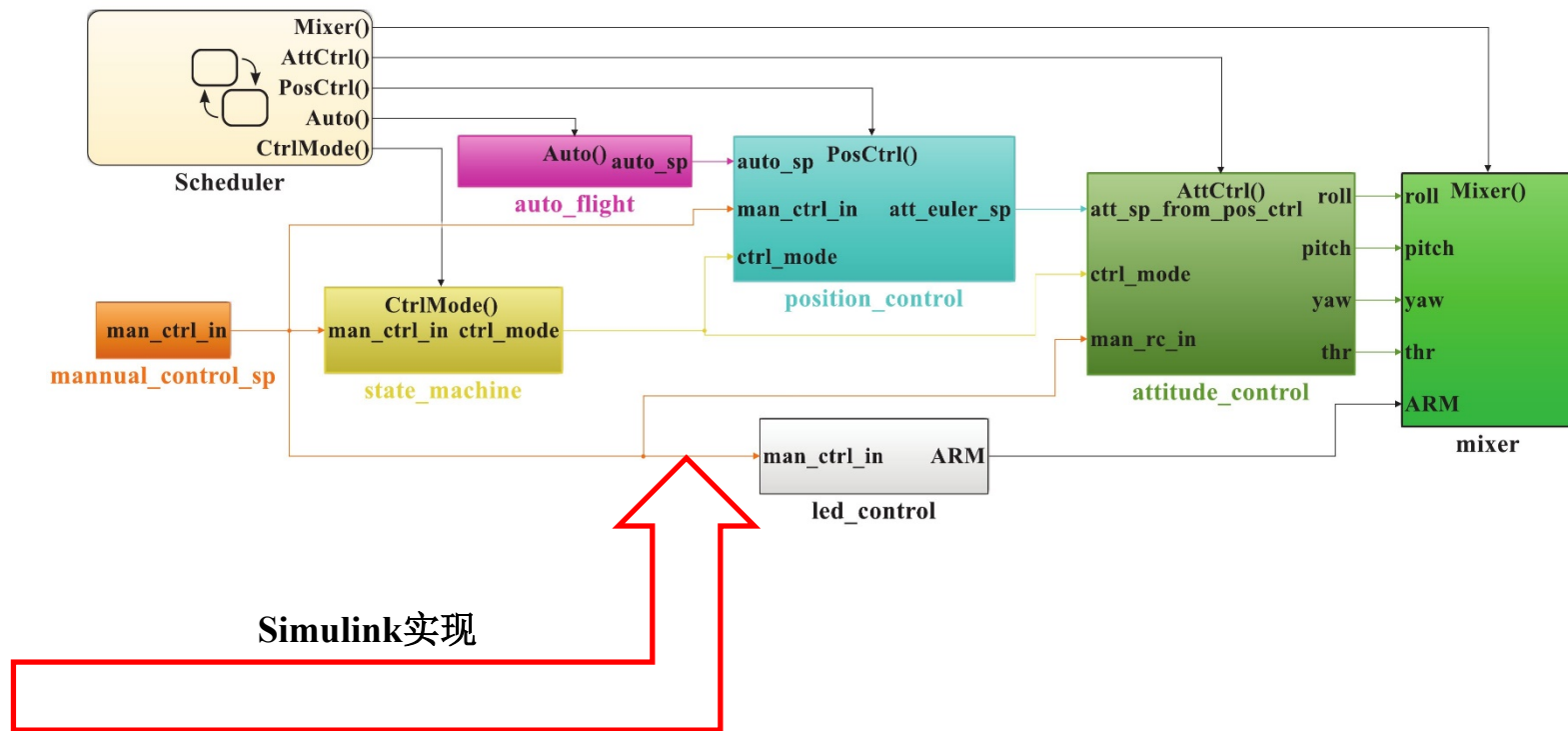
如何开发自驾仪系统

□ 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

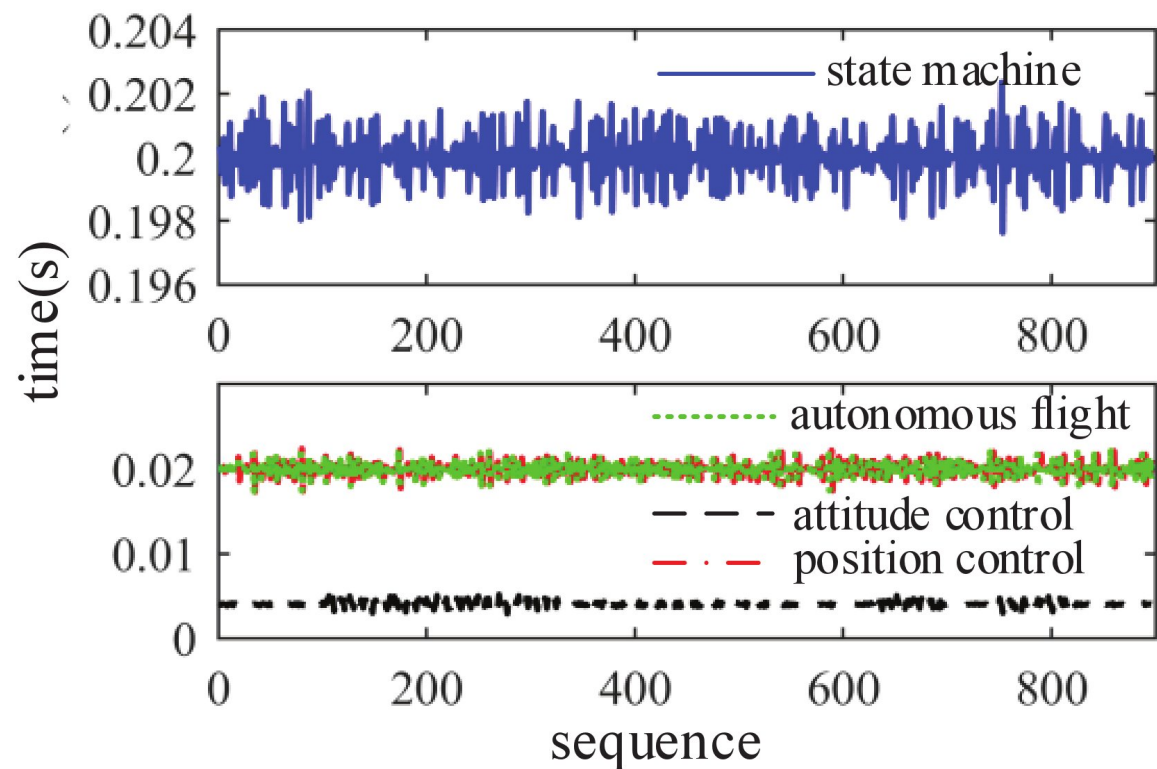
S. Wang, X. Dai, and Q. Quan, "A Rapid Multicopter Development Platform for Education and Research based on Pixhawk and MATLAB," in 2020 IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2020.



如何开发自驾仪系统

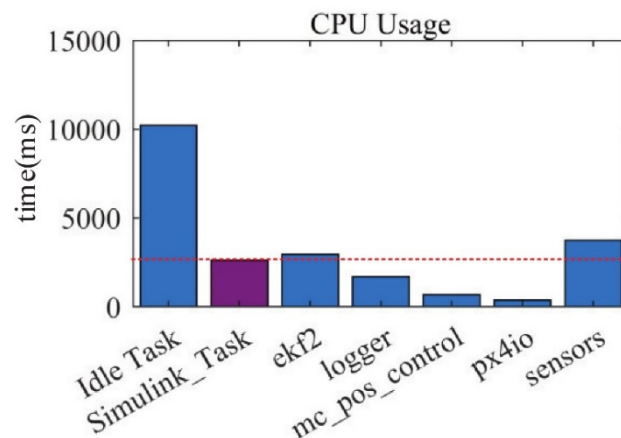
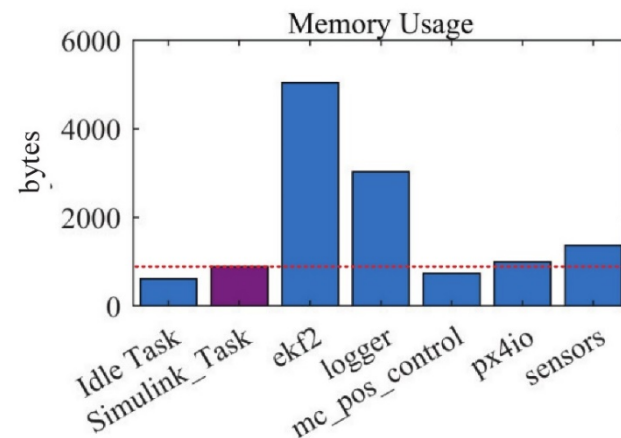
□ 设置时钟：性能

	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



周期执行准确

内存和CPU的使用较低

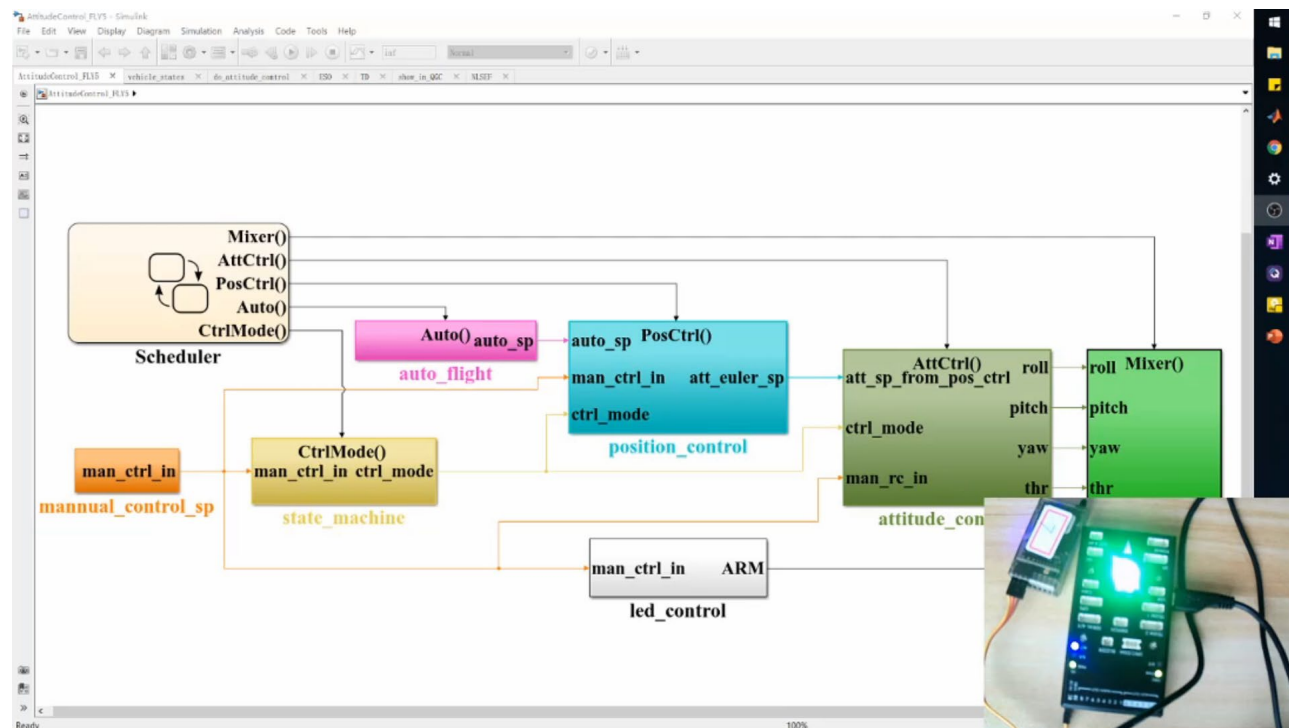
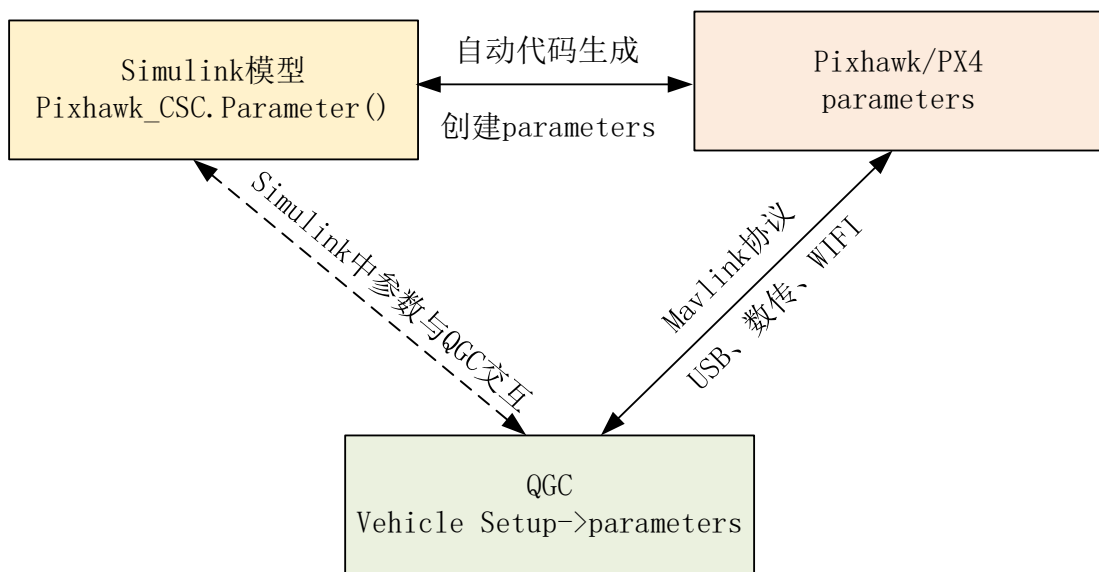




如何开发自驾仪系统

□ 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。

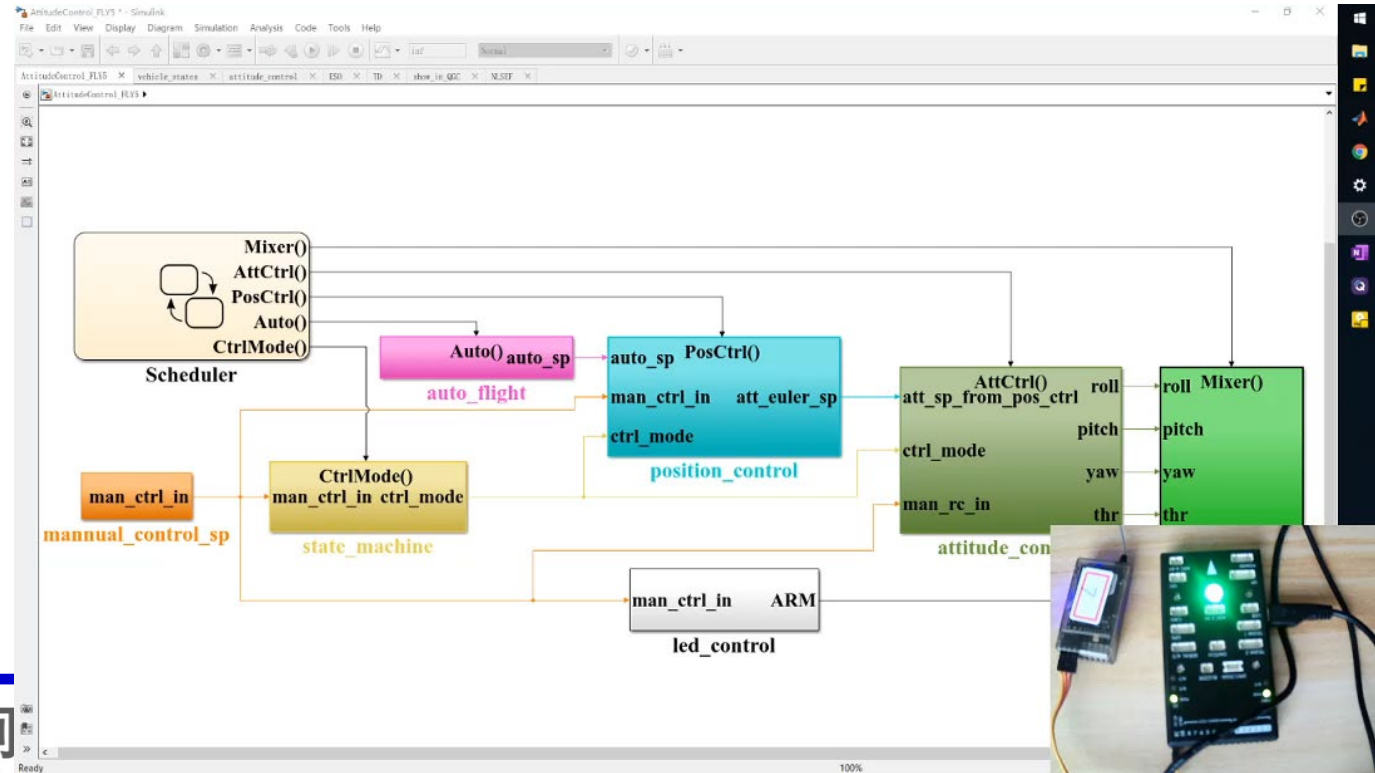
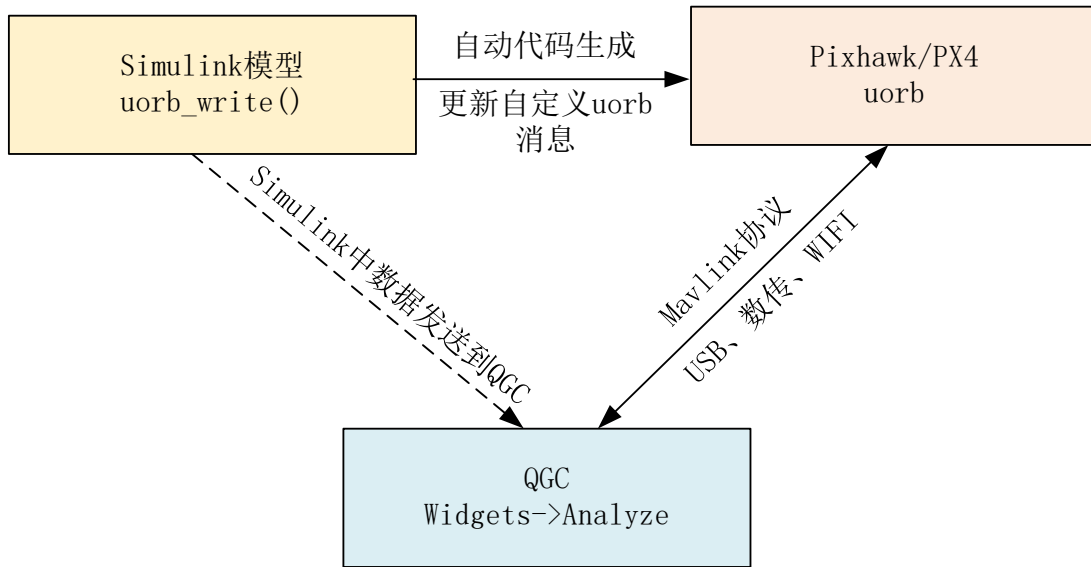




如何开发自驾仪系统

□ 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？



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
- 扫二维码关注可靠飞行控制研究组公众号 **buarfly** (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!