



---

# 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



北航可靠飞行控制研究组

BUAA Reliable Flight Control Group



# 大纲

---

1. 多旋翼
2. 教育的新需求
3. 实验平台
4. 课程设置
5. 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

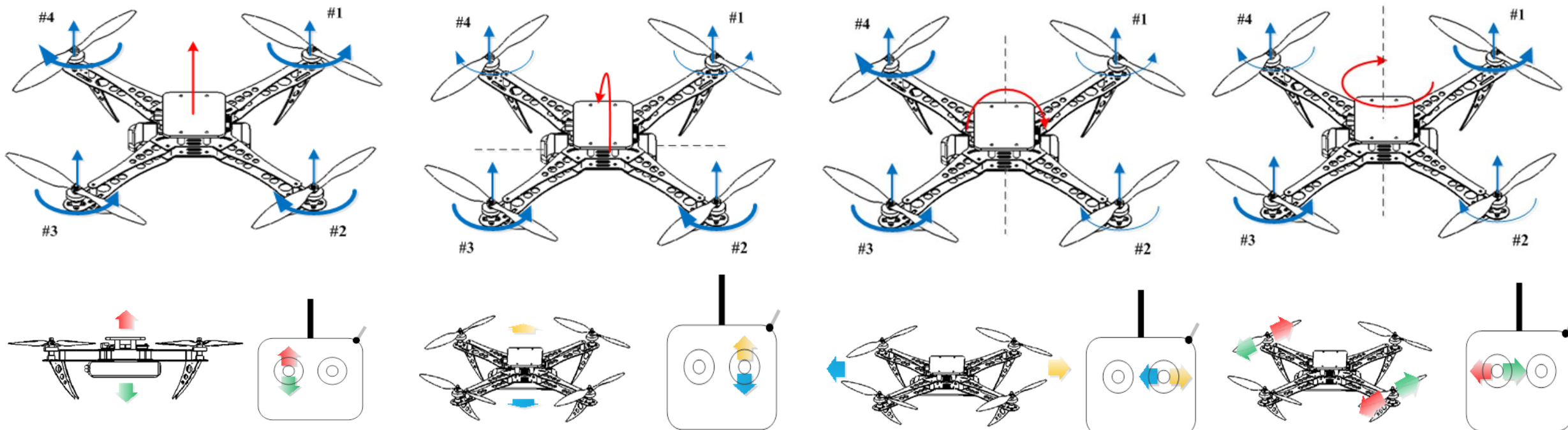
优点：垂直起降、机械结构简单、易维护

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

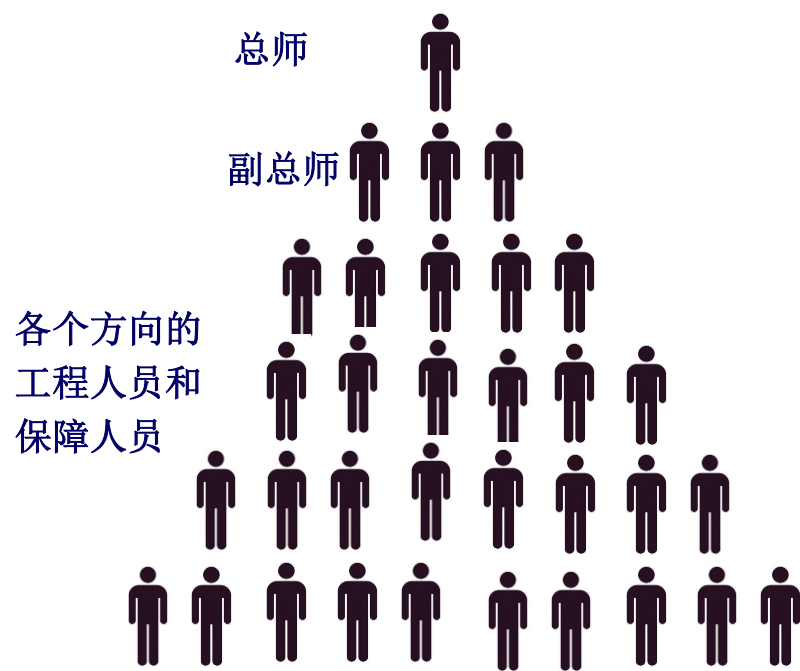
刚性体验让人们选择了多旋翼，无人机教育从多旋翼入手





# 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



### 多旋翼飞行器设计与控制

本书是一本全面、系统地介绍多旋翼飞行器原理的教科书，不仅包括设计、制造、测试、维护等各个环节，还涵盖了多旋翼飞行器的设计、制造、测试、维护等各个环节。

- 本书的主要特点如下：
- 系统性和实用性：涵盖了从设计到测试的全过程。
- 切合性和前瞻性：贴近工程实际，具有前瞻性。

本书内容也与用户工程密切相关，可作为工程技术人员的学习参考书，也可作为高等院校相关专业教材。

This introductory text is a welcome addition to the literature on multicopter design and control, on which the author is an acknowledged authority. The book is directed to advanced undergraduate and beginning graduate students in aerospace and control, for electrical engineering, as well as to multicopter designers and hobbyists. It is a book that is easy to read and understand, and it is a book that is easy to use.

This is the single best introduction to multicopter control. Clear, comprehensive and progressing from basic principles to advanced techniques, it's a must read for anyone hoping to learn how to design flying robots. (This is a book that is easy to read and understand, and it is a book that is easy to use.)

—— Chris Anderson, 3D Robotics CEO





# 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



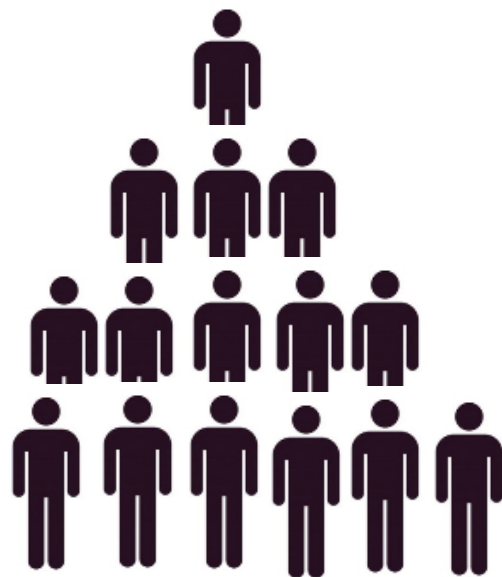
????

如何降低学习门槛？：新工具+新教程





# 教育的新需求



教育

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

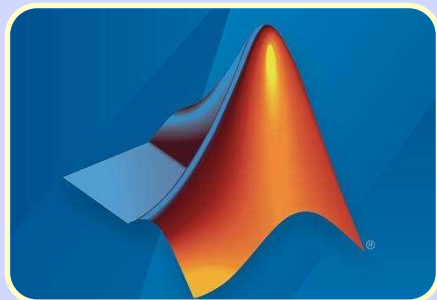


# 实验平台



**Pixhawk:**

微小型飞行器用得**最广泛**的自驾仪硬件



**Matlab:**

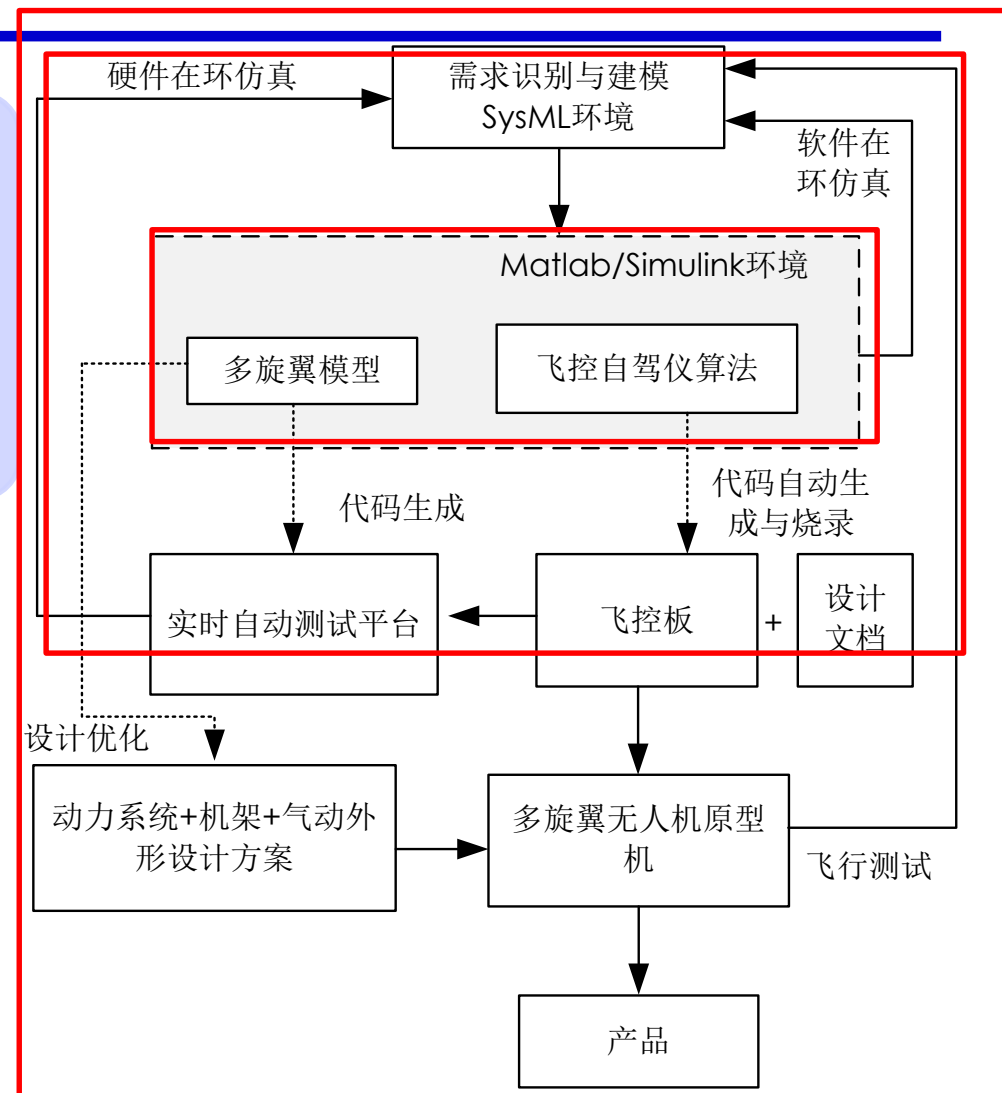
自动化专业用得**最广泛**的语言之一



**多旋翼:**

航空领域用得**最多的**飞行器

## 基于模型开发



# 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

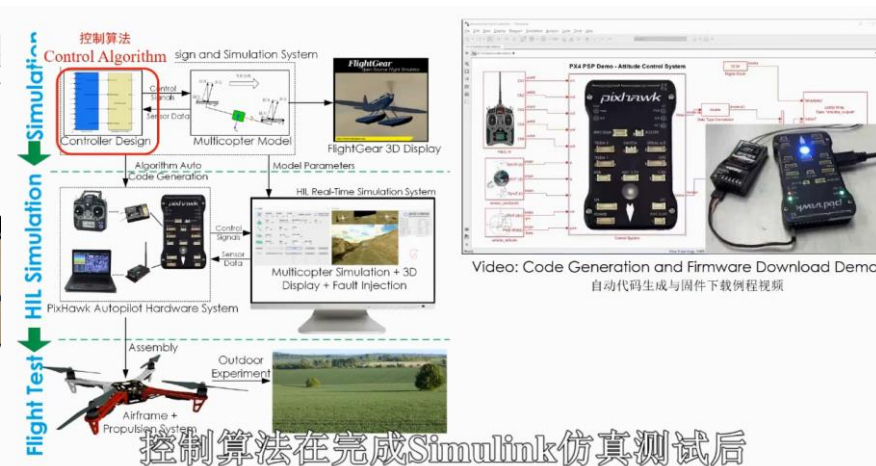
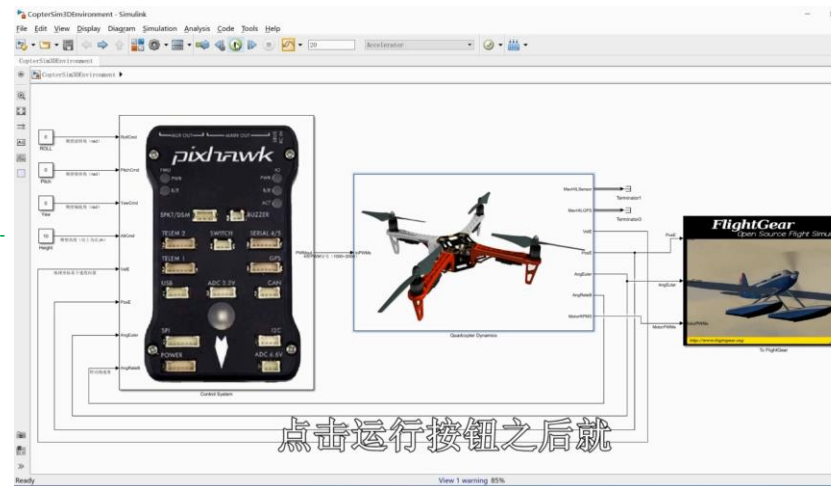
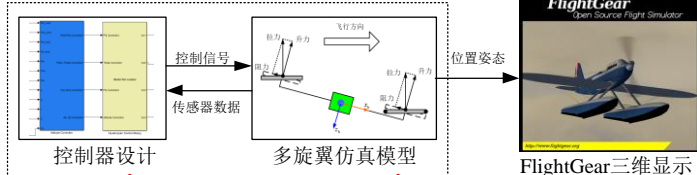




# 实验平台

软件仿真  
↓  
硬件在环仿真  
↓  
台架测试  
↓  
试飞实验

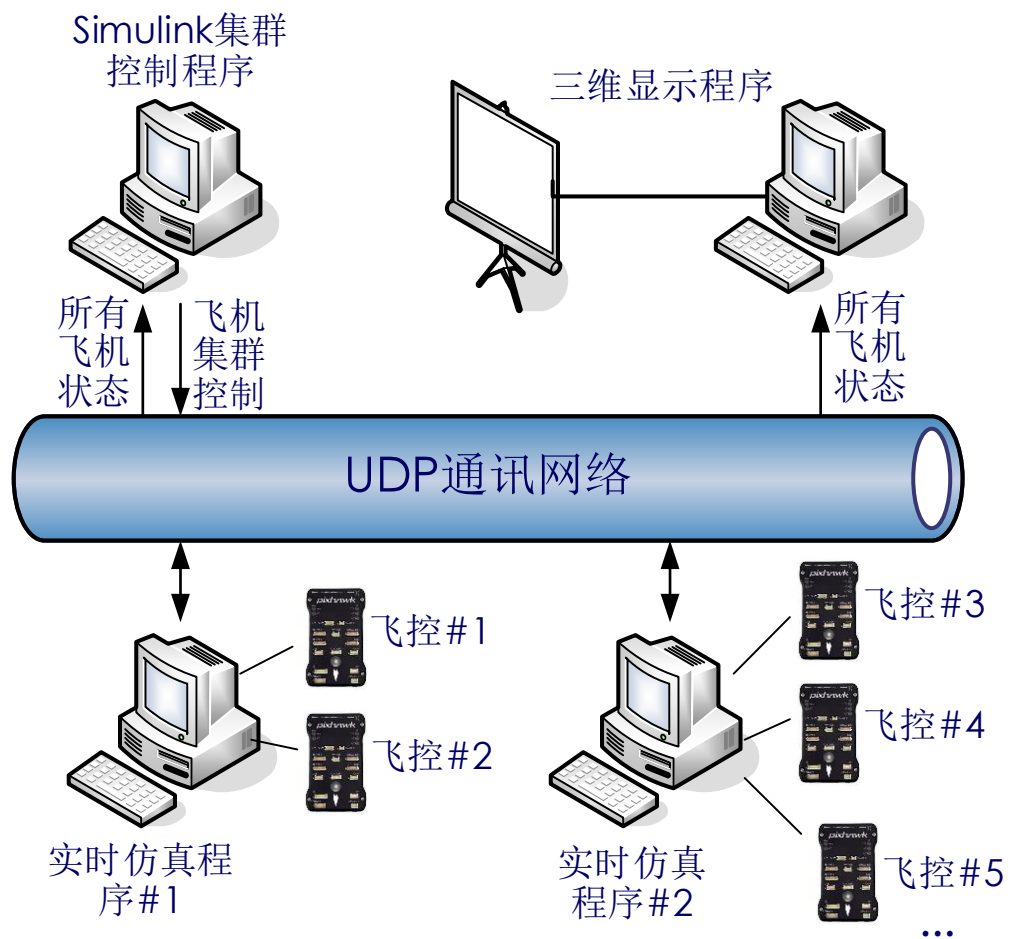
Matlab/Simulink开发仿真环境







# 实验平台



分布式集群控制仿真框图

实物图







Exp3\_Mul...



街区公园场  
景



CopterSi...

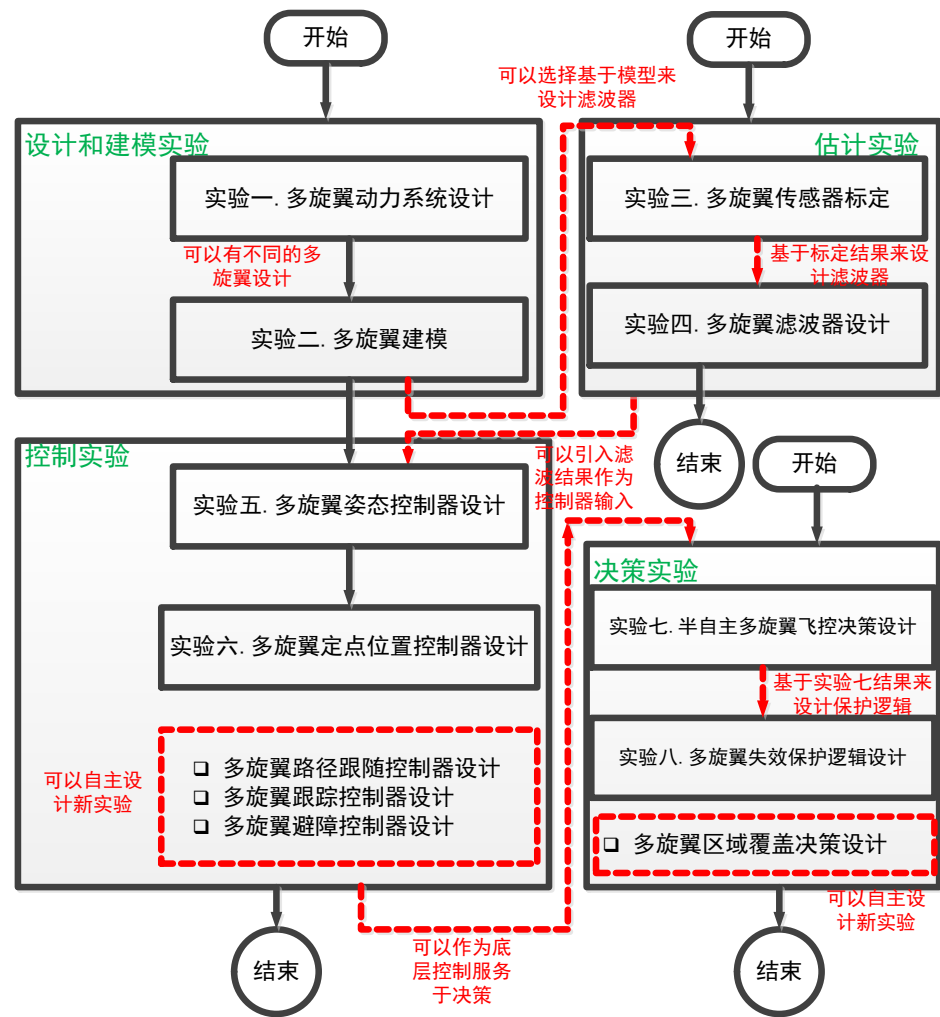




# 课程设置

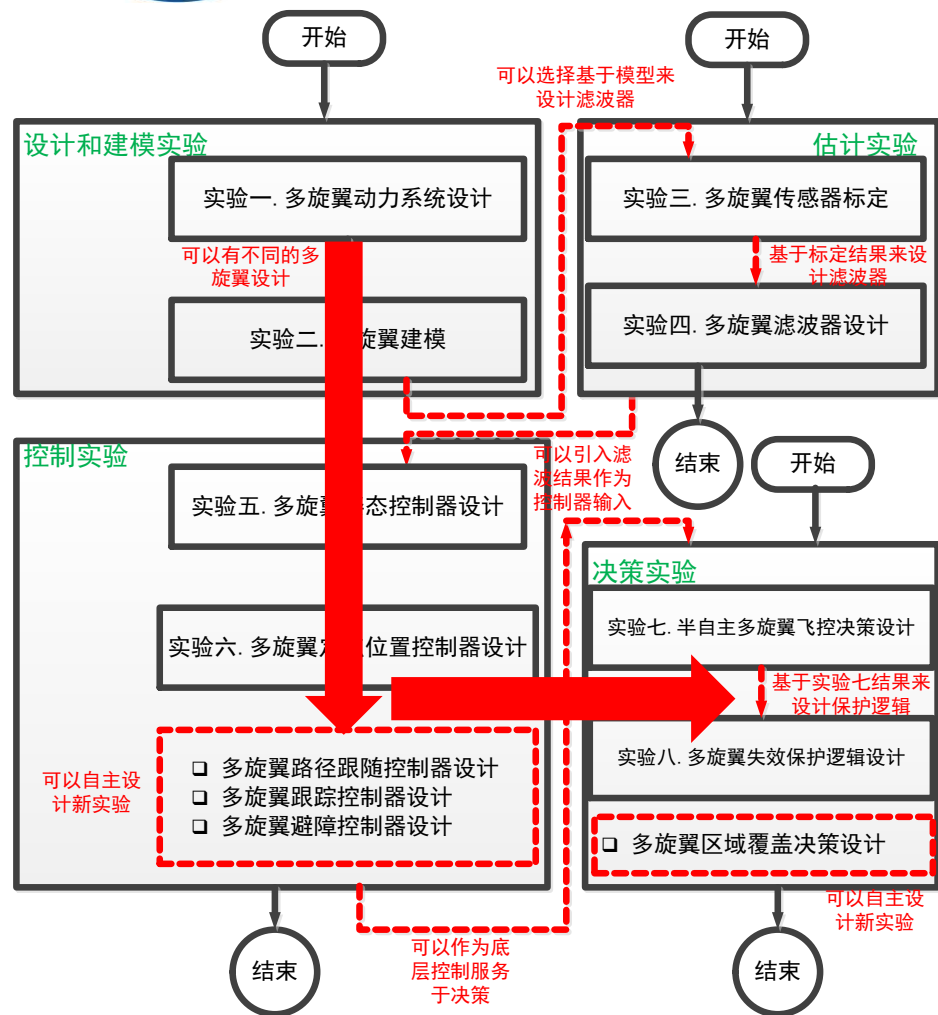
## □ 实验内容和框架设计

- 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

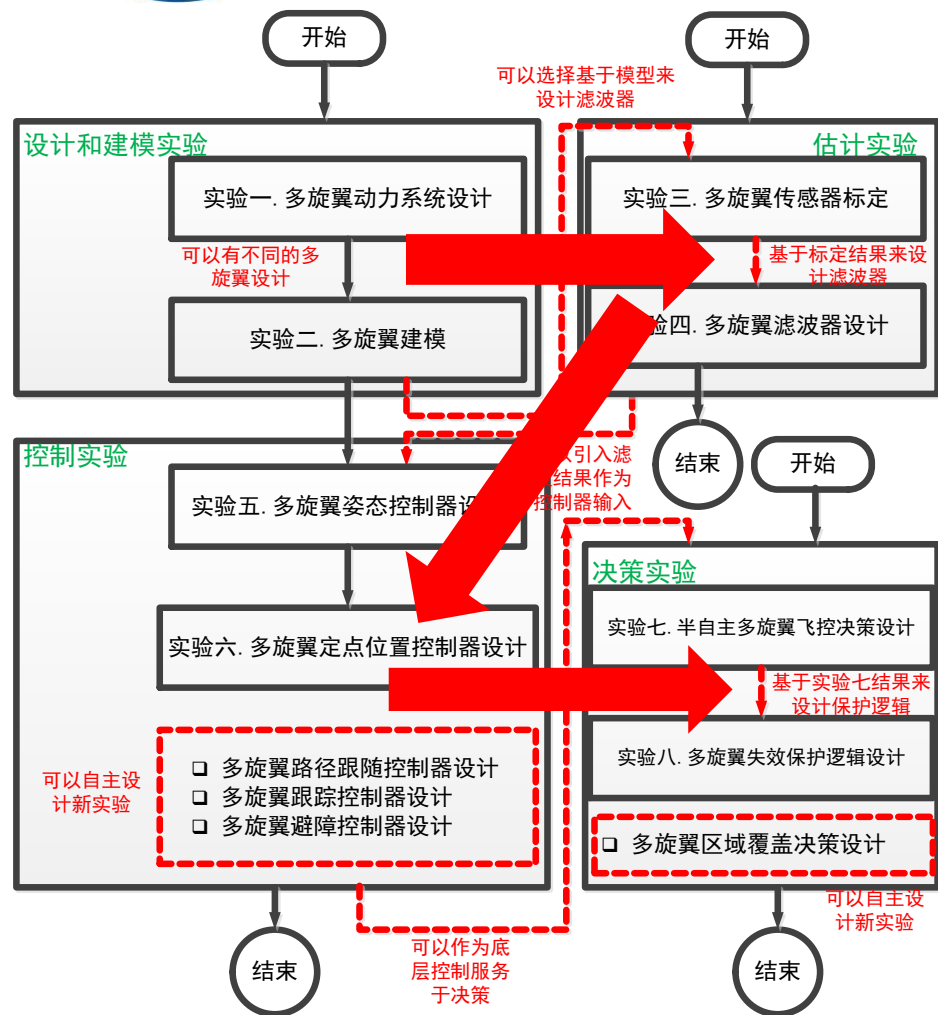
■ 需要**设计不同的飞行器**，这样将会使**模型各不相同**，而且**建模方法也可以各不相同**，**控制实验的设计也各不相同**。

■ 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

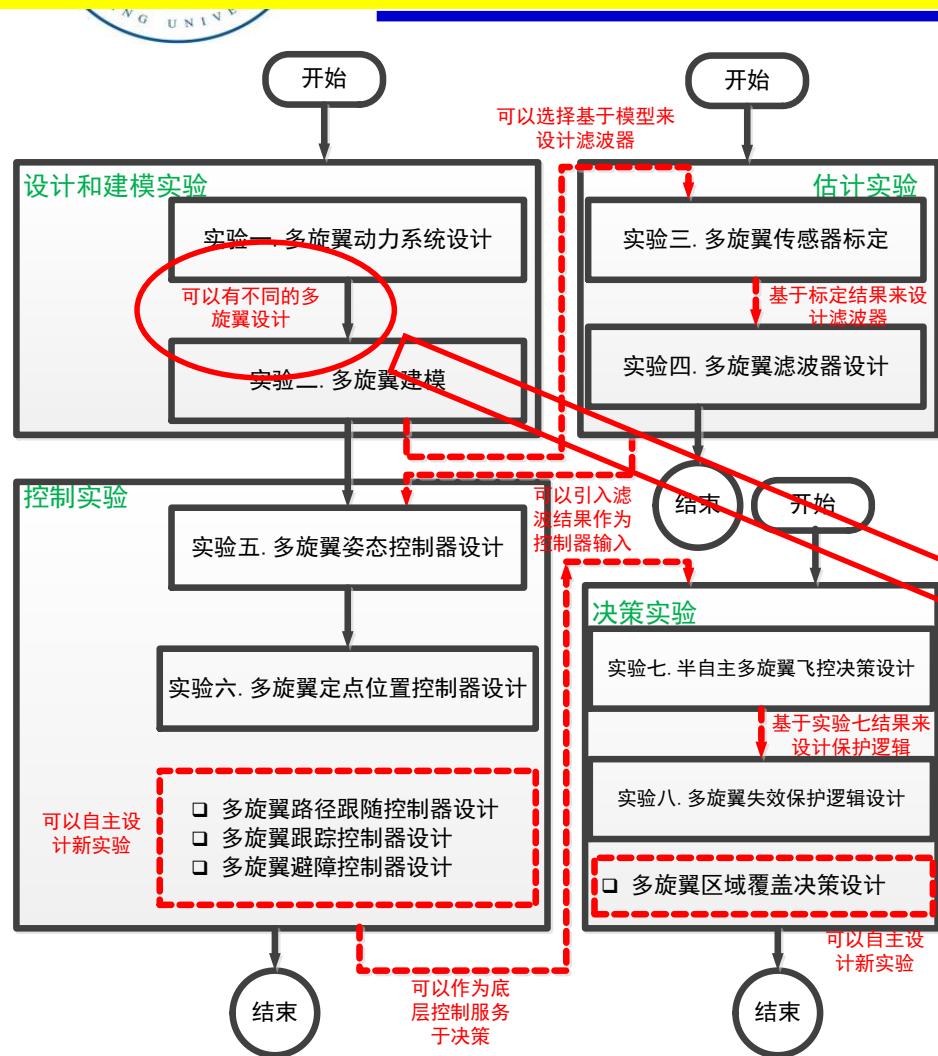
(2) 设计和建模实验 -> 控制实验-> 决策实验

(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**





### 飞行评测 Flying Evaluation

首页 设计 (Beta) 反馈&联系 关于我们 语言 ▼

无人机重量: 1.5 kg	机架轴距: 450 mm	飞行海拔: 200 m	空气温度: 25 °C	外形气动: 一般
电池放电下限: 15%	安全起飞油门上限: 85%	飞控最大倾角: 无限制	飞控额定电流: 0.5 A	
电机品牌: T-MOTOR (老虎电机)	型号: MN2212 V2.0 KV920			
螺旋桨品牌: APC	型号: 10x4.5MR			
电调品牌: Hobbywing (舒盖)	型号: XRotor 40A			
电池品牌: ACE (倍思电池)	型号: LiPo 3S-11.1V-30C-5300mAh	电池串联-并联组合: 1 S 1 P		

### 控制模型 (说明文档)(课件)

多旋翼总质量:  $m = 1.5 \text{ kg}$

重力加速度:  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

转动惯量矩阵:  $J = \text{diag}(J_{xx}, J_{yy}, J_{zz})$

多旋翼机身半径(1/2轴距):  $d = 0.225 \text{ m}$

螺旋桨推力系数( $T_p/\omega^2$ ):  $C_T = 1.2018 \times 10^{-5} \text{ N/(rad/s}^2\text{)}$

螺旋桨力矩系数( $M_p/\omega^2$ ):  $C_M = 2.1008 \times 10^{-7} \text{ Nm/(rad/s}^2\text{)}$

油门( $\sigma$ )到电机稳态转速( $\omega_{ss}$ ):  $C_R = 708.7 \text{ rad/s}$

( $\omega_{ss} = C_R \cdot \sigma + \omega_b$ ):  $\omega_b = 146.07 \text{ rad/s}$

电机螺旋桨转动惯量:  $J_m = 1.16 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$

电机响应时间常数:  $T_m = 0.0673 \text{ s}$

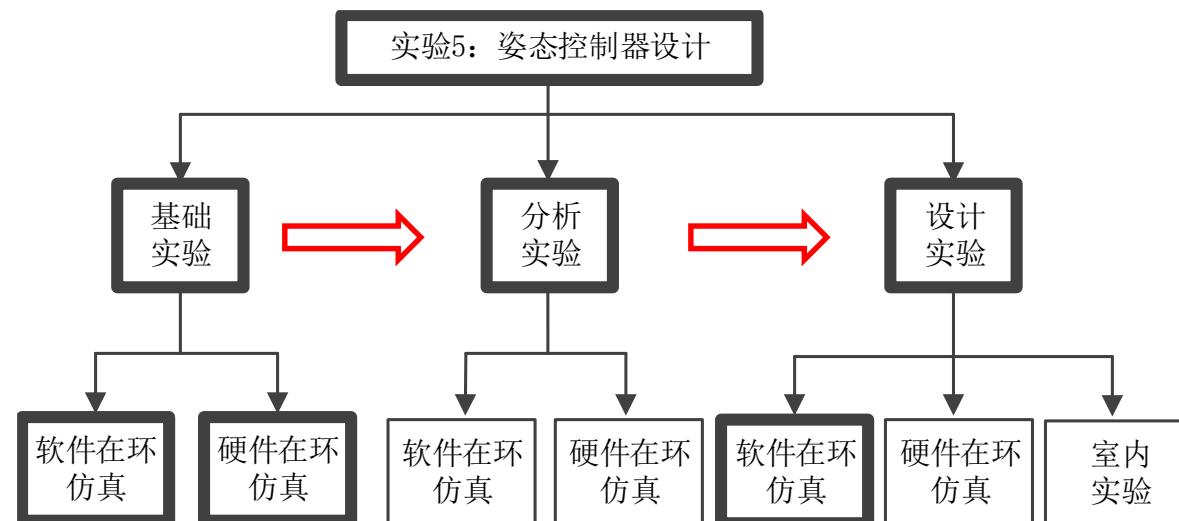
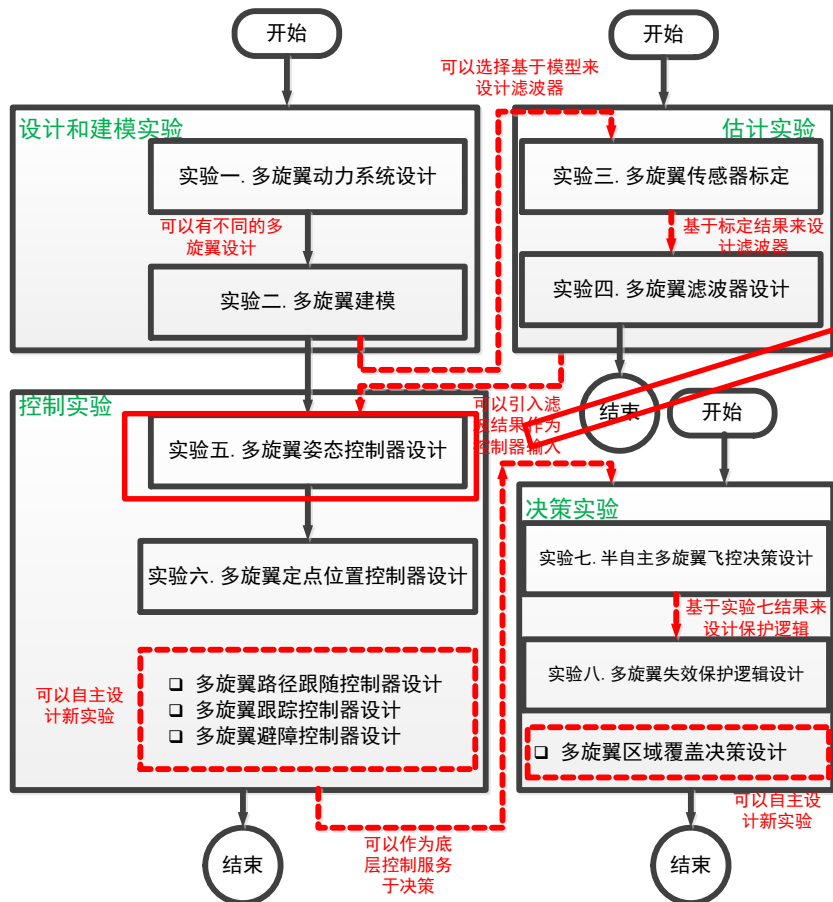
多旋翼空气阻力系数( $D/v^2$ ):  $C_d = 0.222 \text{ N/(m/s}^2\text{)}$





# 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	×	×	✓

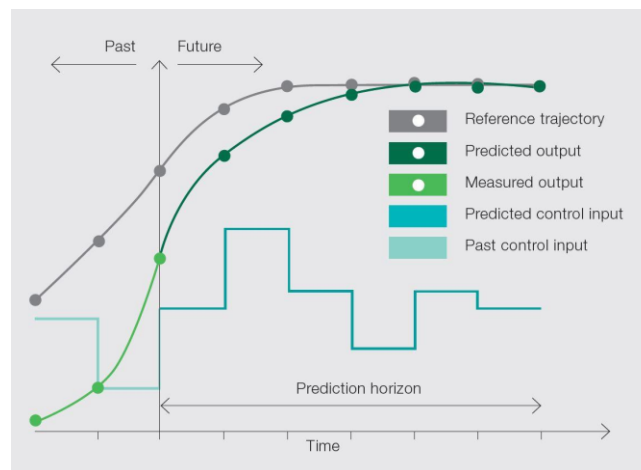
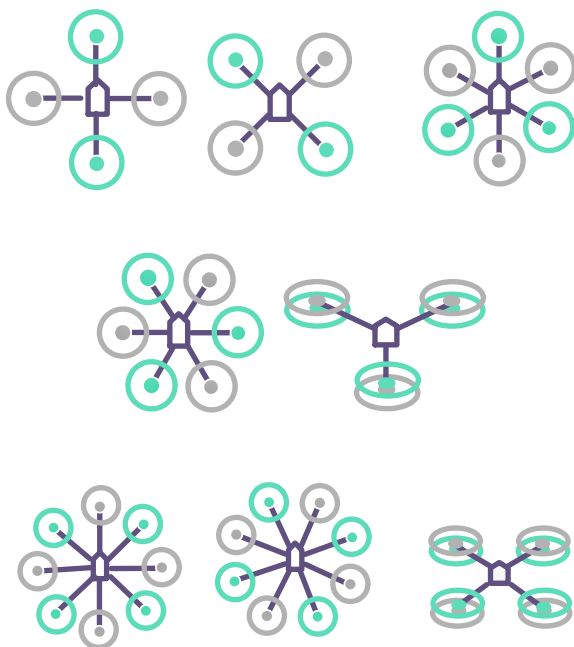


# 课程设置

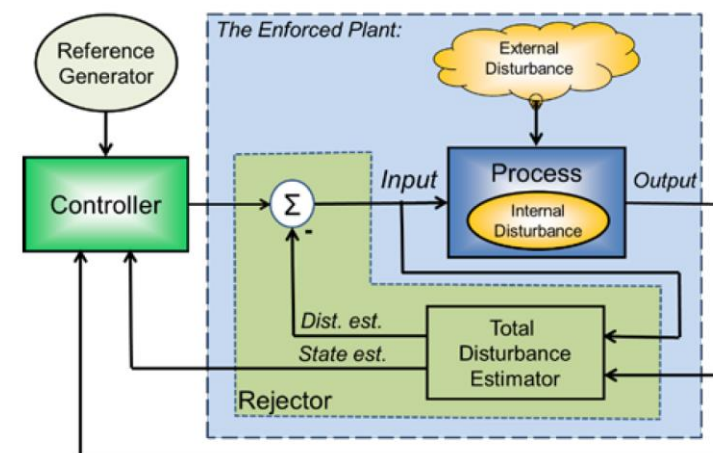
## □ 教学设计

□ 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



# 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？

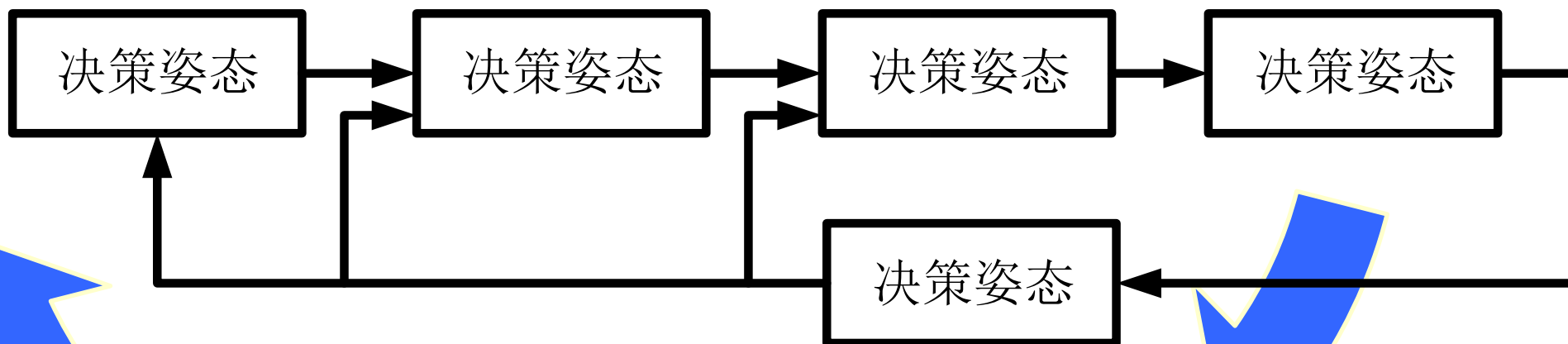


# 总结



飞行测试

软件在环仿真



硬件在环仿真





# 谢谢！

