



多旋翼飞行器设计与控制

第一讲 绪论

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



东方智慧



竹蜻蜓



核心问题

人们为什么最终选择了多旋翼飞行器？



大纲

1. 基本概念
2. 多旋翼操控和评价
3. 多旋翼技术发展历史
4. 本门课的安排



1.基本概念

□ 常见飞行器分类



(a) 固定翼



(b) 直升机



(c) 多旋翼

图1.1: 常见飞行器

(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



1.基本概念

□常见飞行器分类



(a)固定翼



(b)直升机



(c)多旋翼

图1.1: 常见飞行器

(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



1.基本概念

□常见飞行器分类



(a)固定翼



(b)直升机



(c)多旋翼

图1.1: 常见飞行器

(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



1.基本概念

□常见飞行器分类

(3) 多旋翼

一般受力特点:

1. 合成拉力垂直桨盘平面
2. 拉力、重力

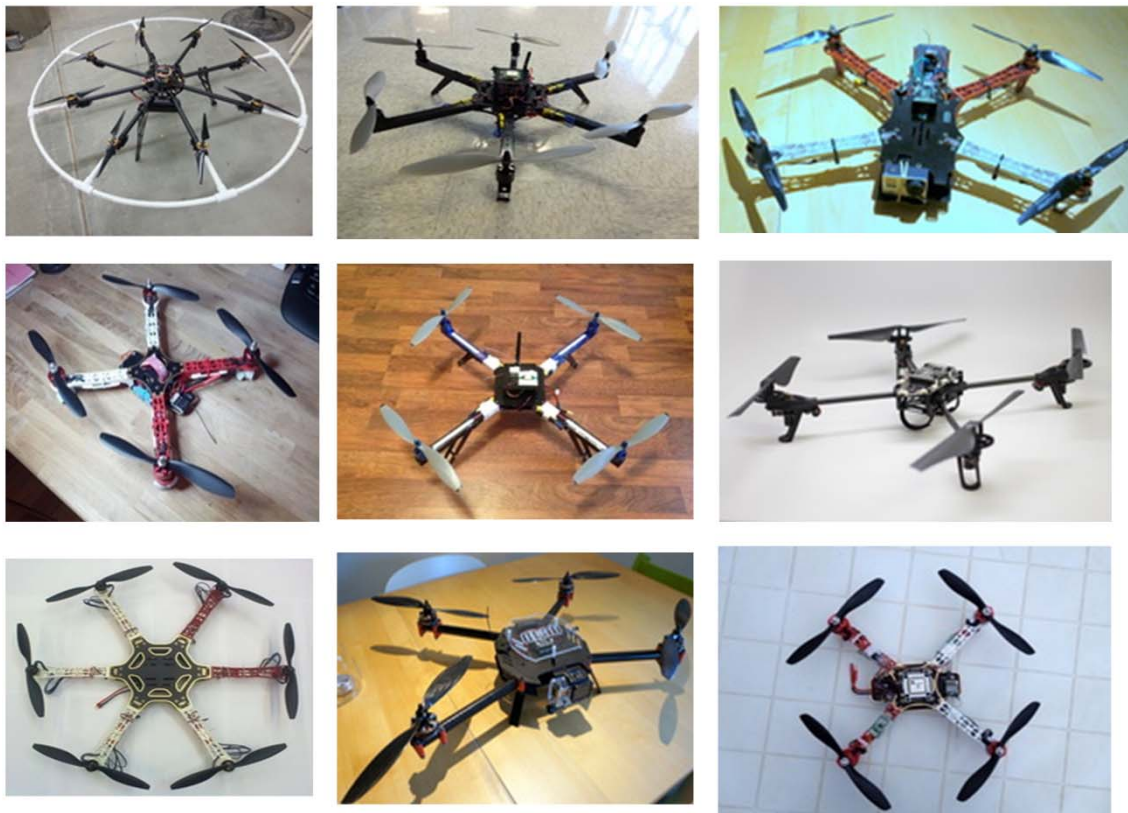


图1.2: 各种多旋翼



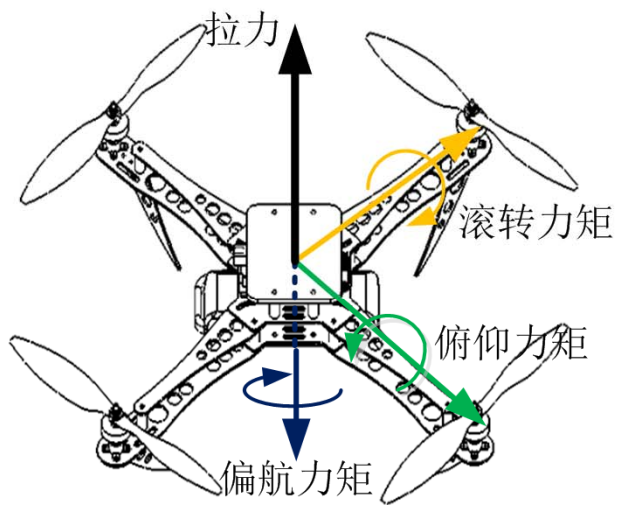
1.基本概念

□ 常见飞行器分类

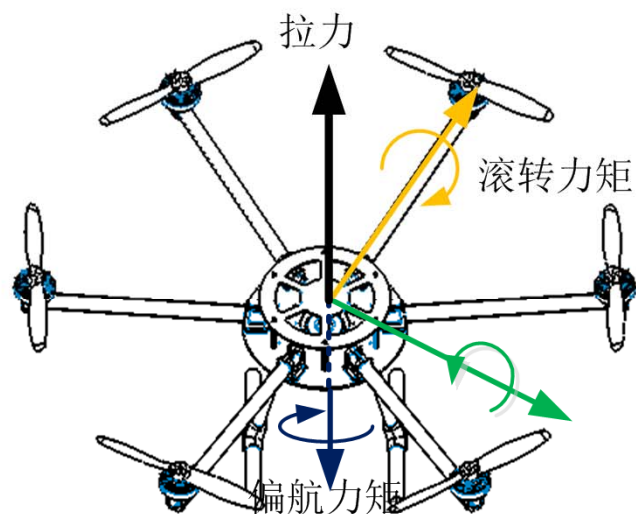
(3) 多旋翼

四旋翼和六旋翼有何分别?

- 无本质区别, 3个力矩+拉力
- 六旋翼控制分配更灵活



(a) 四旋翼



(b) 六旋翼

图1.3: 四旋翼和六旋翼的拉力与力矩



1.基本概念

□ 常见飞行器分类

(4) 复合飞行器



(a) 倾转三旋翼



(b) 复合式直升机

图1.4: 复合式直升机从悬停模态转换到前飞模态示意图



1.基本概念

□常见飞行器分类

(4) 复合飞行器[3]

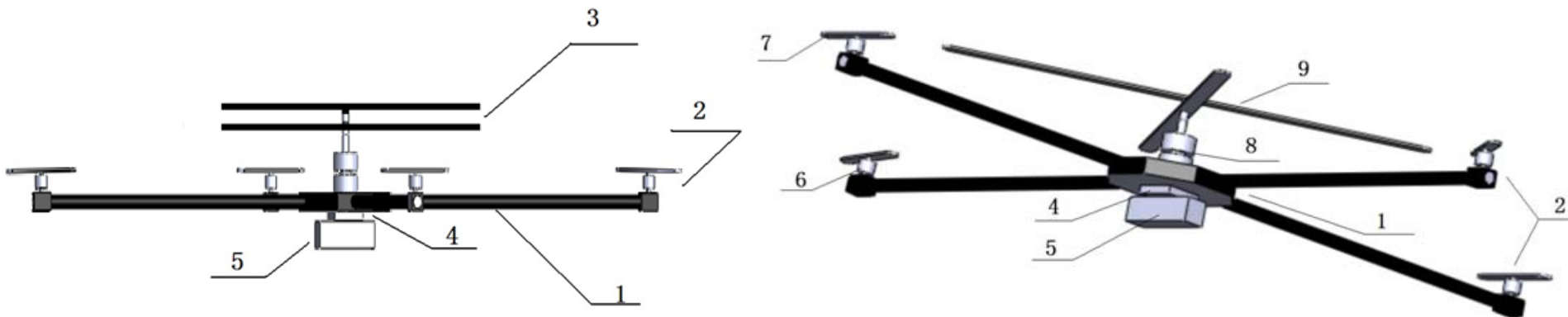


图1.5: 复合多旋翼

这里，中间的共轴双桨转速动态较慢，提供主要升力，而外围的四旋翼通过快速改变螺旋桨的速度改变升力，从而改变姿态。



1.基本概念

□ 无人驾驶飞机和航模[4-6]

(1) 无人驾驶飞机 (Unmanned Aerial Vehicle) : 简称“无人机”, 英文缩写为“UAV”, 是利用无线电遥控设备和自备的程序控制装置操纵的不载人飞机。微小型无人机英文 “Drone”

(2) 航模 (Model Aircraft) : 在国际航联制定的竞赛规则里明确规定“航空模型是一种重于空气的, 有尺寸限制的, 带有或不带有发动机的, 可遥控的不能载人的航空器。”



1.基本概念

□ 无人驾驶飞机和航模

	无人机	航模
操控方式	可自主驾驶	需遥控操纵
用途	军事用途/民用特种用途	接近于玩具
组成	复杂，需地面站	简单，无需地面站

半自主控制方式: 多旋翼属于航模范畴

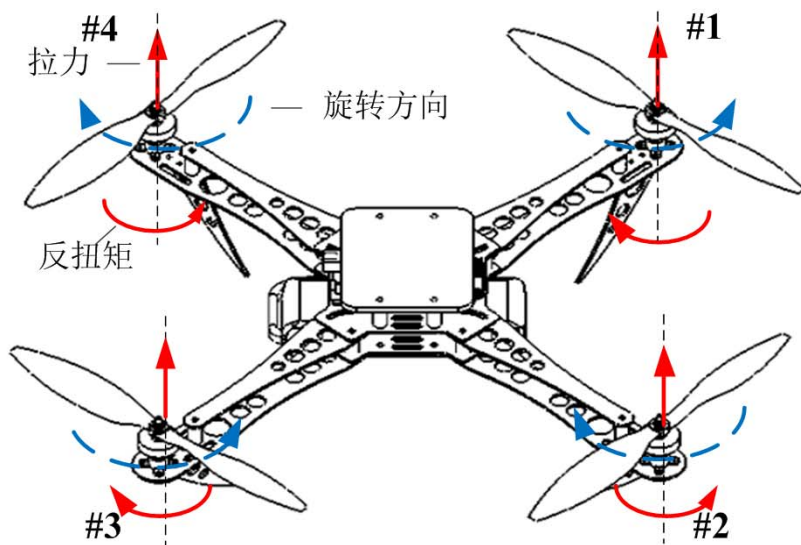
全自主控制方式: 多旋翼属于无人机范畴



2.多旋翼操控和评价

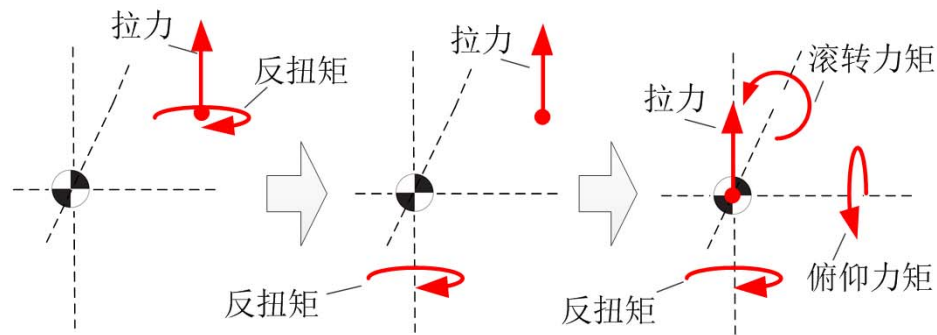
□ 四旋翼的操控

(1) 悬停



(a) 悬停飞行的四旋翼受力

- 当飞行器悬停时，
- 拉力抵消重力
- 四个螺旋桨拉力产生的滚转、俯仰力矩为零
- 偏航力矩为零，四个螺旋桨反扭矩效应均被抵消



(b) 1号螺旋桨的力和力矩作用到四旋翼中心的过程示意图

图1.6: 四旋翼悬停



2.多旋翼操控和评价

多数直升机即单旋翼直升机都有一个垂直尾桨来抵消反作用力矩，或者采用共轴双桨，上下两个螺旋桨转动方向相反，从而抵消之间的反扭矩的作用。

□ 四旋翼的操控

(1) 悬停

直升机如何抵消反扭矩？



(a) 直10

尾桨



(b) 北航“海鸥”

共轴双桨



2.多旋翼操控和评价

同时同量地增加四个螺旋桨的转速，则螺旋桨产生的总拉力增大，力矩和依然为零。拉力大于重力时，四旋翼就会上升

□ 四旋翼的操控

(2) 升降运动

上升运动螺旋桨变化(+表示增加转速)

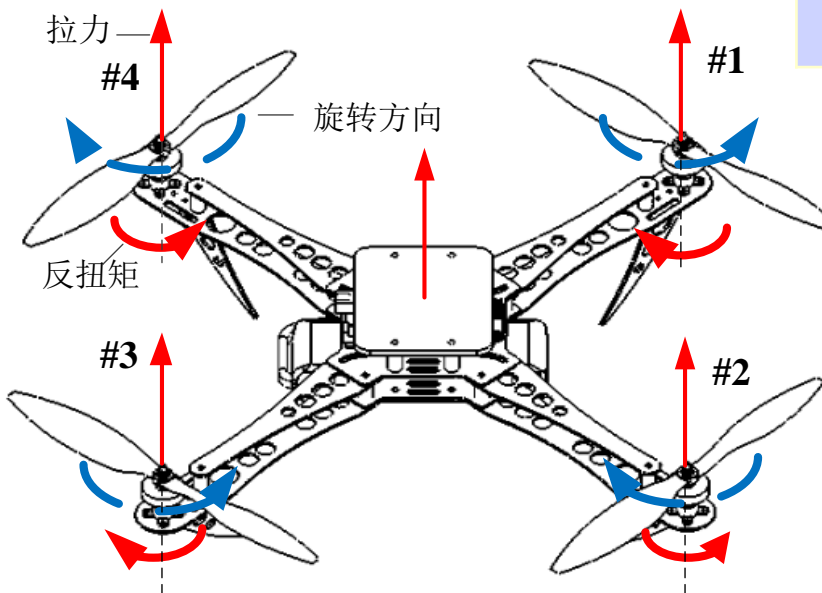


图1.7: 四旋翼上飞

	#1	#2	#3	#4
改变拉力	+1	+1	+1	+1

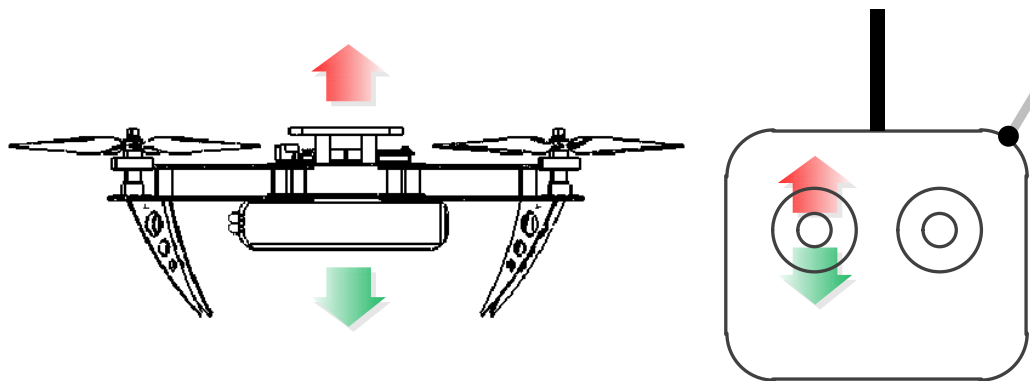


图1.8: 上下运动时遥控器的操作方式



2.多旋翼操控和评价

同时同量减少螺旋桨#1、#4的转速，同时同量增加螺旋桨#2、#3的转速，会引起四旋翼向前俯仰。然后，拉力会产生向前的分量。

□ 四旋翼的操控

向前运动螺旋桨变化(-表示降低转速)

(3) 前后运动

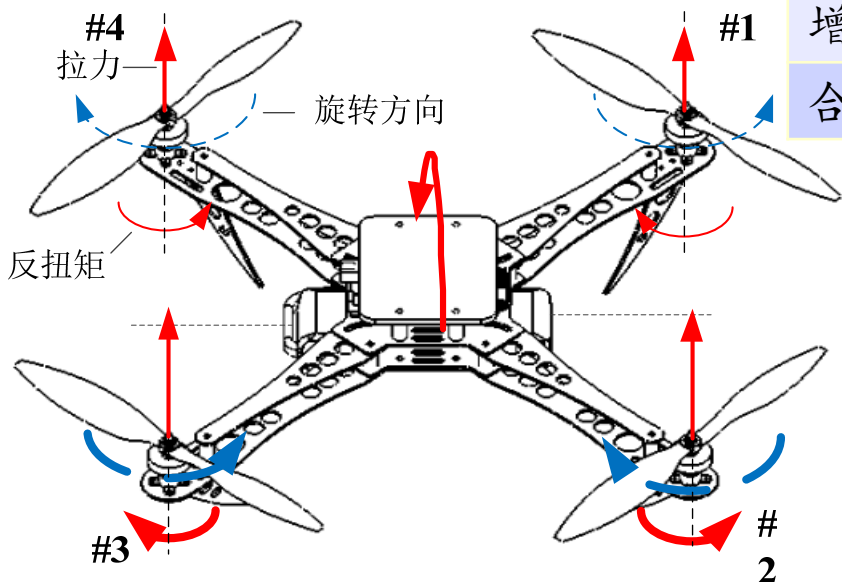


图1.9: 四旋翼前飞

	#1	#2	#3	#4
改变俯仰	-1	+1	+1	-1
增加拉力	+0.2	+0.2	+0.2	+0.2
合成	-0.8	+1.2	+1.2	-0.8

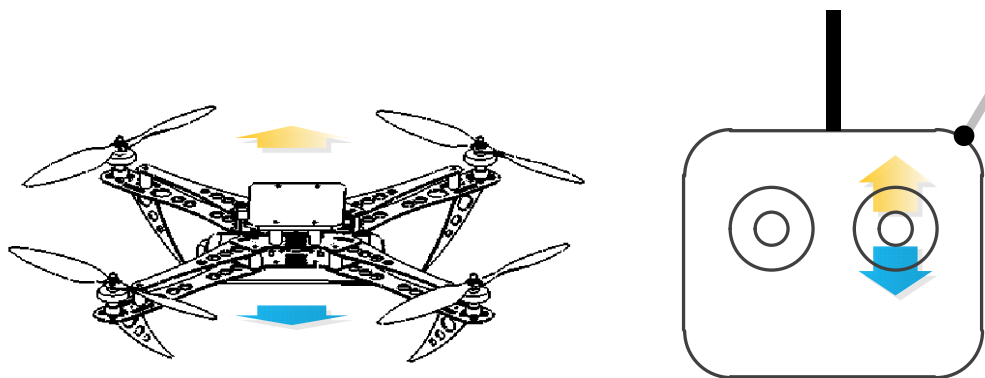


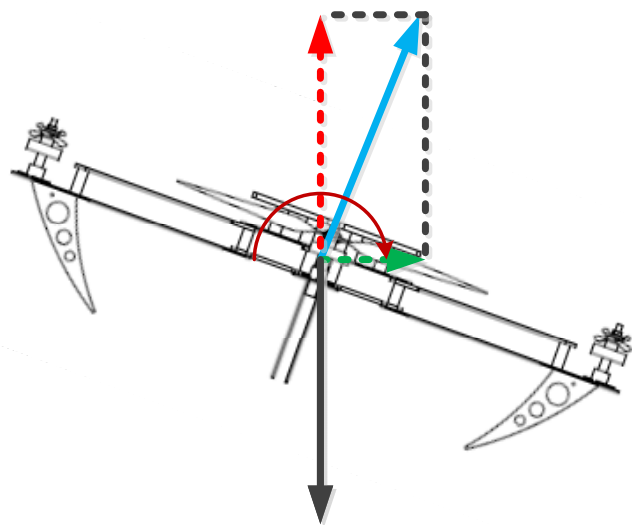
图1.10: 前后运动时遥控器的操作方式



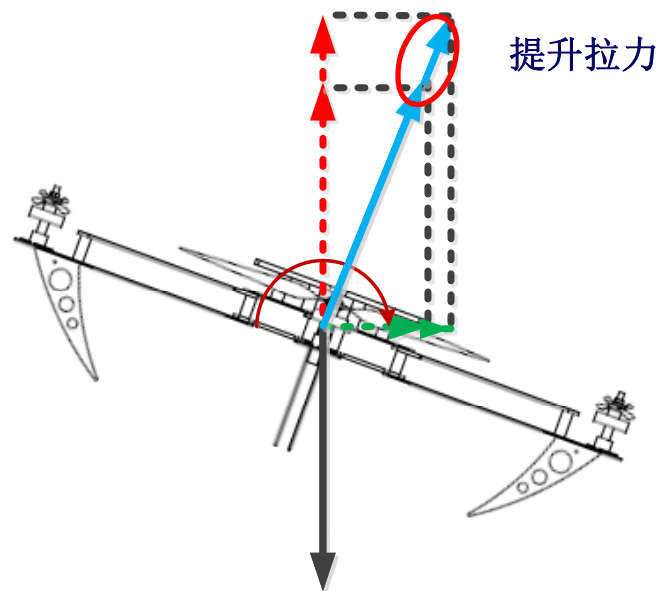
2.多旋翼操控和评价

□ 四旋翼的操控

(3) 前后运动



(a) 改变俯仰



(b) 增加拉力

可以看到，改变俯仰后，拉力的垂直分量会减小，将不再等于多旋翼的重力，因此需要增加拉力。

倾斜后拉力在重力方向的分量抵消不了重力，因此需要再提升拉力



2.多旋翼操控和调

，同量减小螺旋桨#1、#2的转速，同时同量增加螺旋桨#3、#4的转速，这将产生不平衡力矩使机身向右滚转倾斜。然后，拉力会产生向右的分量。

□ 四旋翼的操控

(4) 左右运动

向右运动螺旋桨变化

	#1	#2	#3	#4
改变滚转	-1	-1	+1	+1
增加拉力	+0.2	+0.2	+0.2	+0.2
合成	-0.8	-0.8	+1.2	+1.2

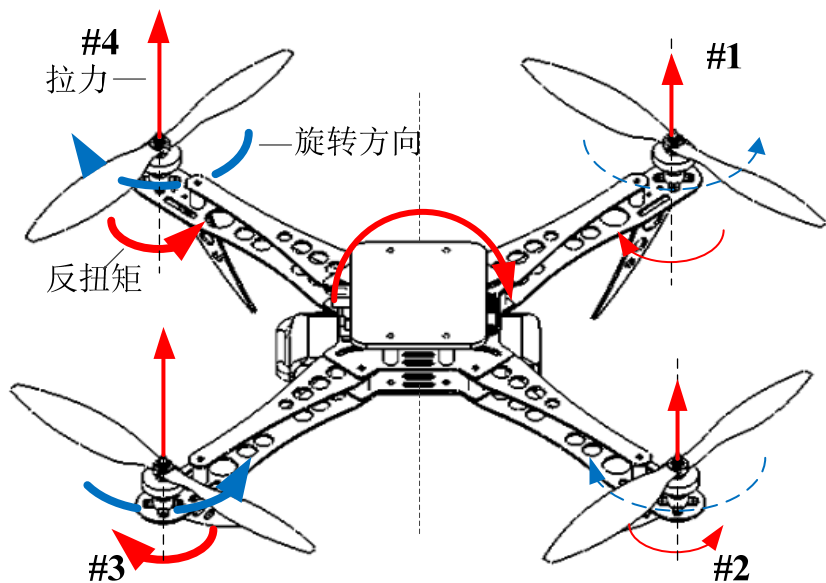


图1.11: 四旋翼右飞

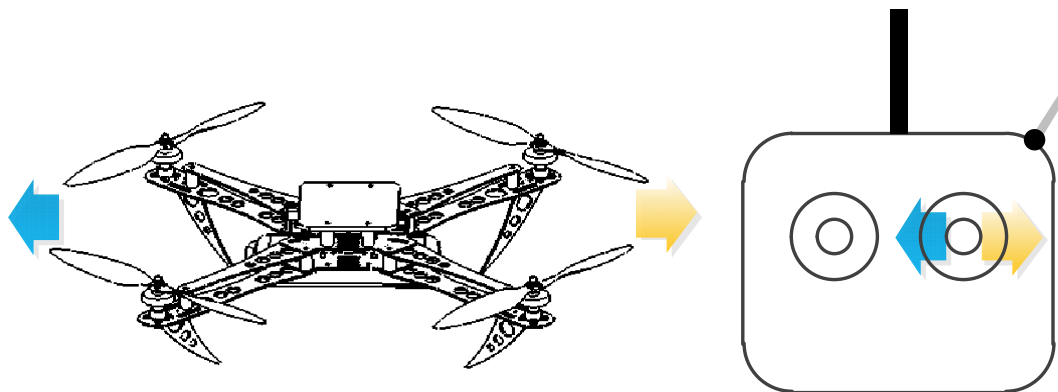


图1.12: 左右运动时遥控器的操作方式



2.多旋翼操控和评估

同量减小螺旋桨#2、#4的转速，同时同量增加螺旋桨#1、#3的转速，这将使前后飞行和左右飞行的力矩为零。但顺时针的偏航力矩增加了，飞机顺时针偏航。

四旋翼的操控

(5) 偏航运动

顺时针偏航运动螺旋桨变化

	#1	#2	#3	#4
改变偏航	+1	-1	+1	-1

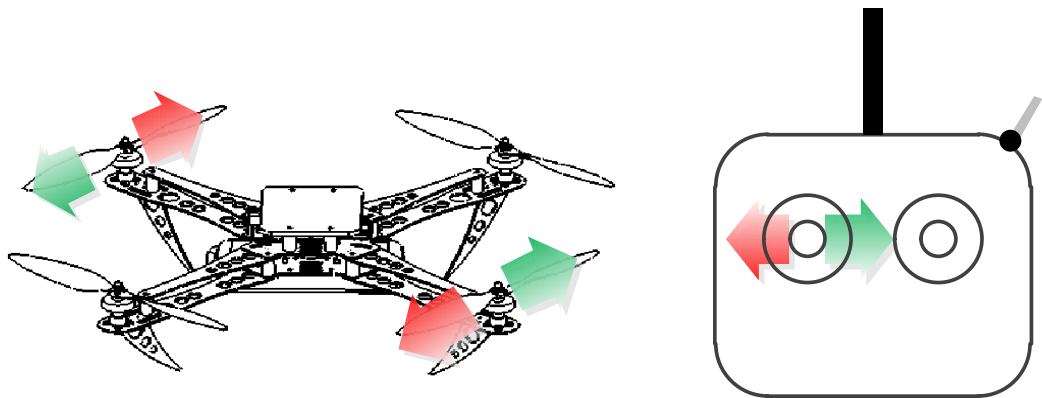
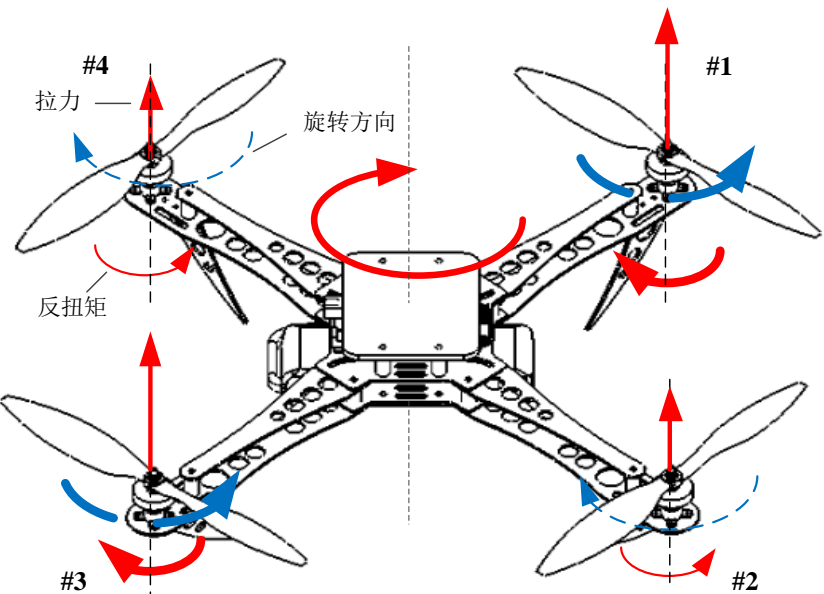


图1.13: 四旋翼顺时针偏航

图1.14: 偏航运动时遥控器的操作方式



2.多旋翼操控和评价

也有缺点：多旋翼能量转换效率最低，所以与固定翼飞行器和直升机相比，多旋翼在飞行时间和承载性上没有优势。

□ 多旋翼的评价

(1) 对比

刚性
体验

	固定翼	直升机	多旋翼
易用性	++	+	+++
可靠性	++	+	+++
维护性	++	+	+++
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



2.多旋翼操控和评价

□ 多旋翼的评价

(2) 局限性 (该方式不宜推广到大尺寸的多旋翼)

1) 桨叶尺寸越大, 越难迅速改变其角速度

$$M = \frac{1}{2\pi} C_M \rho \omega^2 (2r_p) \quad \Rightarrow \quad \begin{matrix} M \sim \omega^2 R^5 \\ J \sim R^5 \end{matrix} \quad \Rightarrow \quad \alpha = \frac{M}{J} \sim \frac{\omega^2 R^5}{R^5} = \omega^2$$

桨尖速度常数假设 $\omega \sim 1/r_p \Rightarrow \omega \sim 1/R$

$$\alpha \sim \frac{1}{R^2}$$

在这个假设下, 我们最终得到, 桨叶的角加速度与多旋翼的特征长度平方的倒数成正比, 也就是多旋翼尺寸越大, 角加速度越小, 即机动性低。



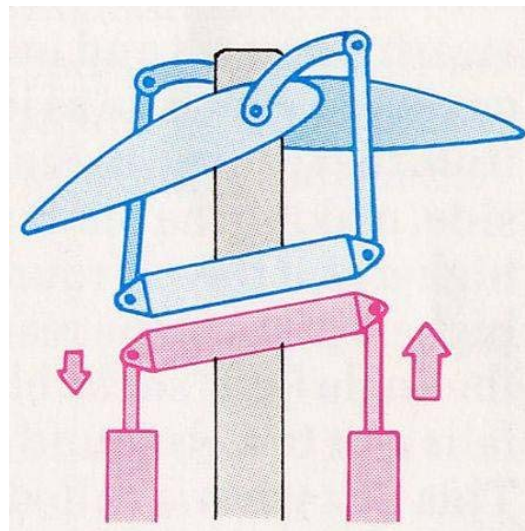
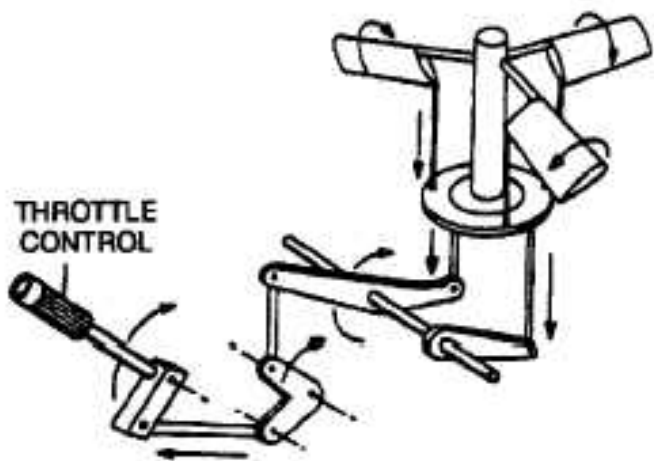
2.多旋翼操控和评价

□ 多旋翼的评价

(2) 局限性

相比之下，直升机靠同时同量改变旋翼的攻角来增加或减少总拉力，从而实现爬升或下降。

1) 桨叶尺寸越大，越难迅速改变其速度



来源<http://aviationmaintenance.tpub.com/>

来源<http://www.aerospaceweb.org/>

直升机通过变桨距控制

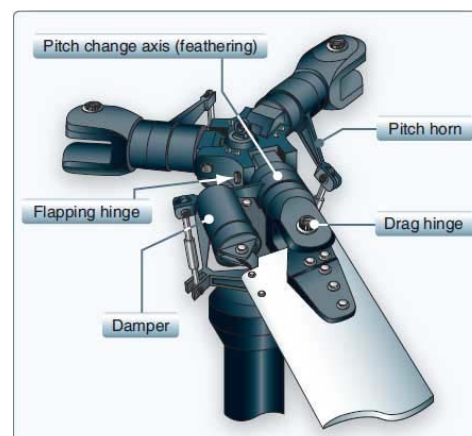
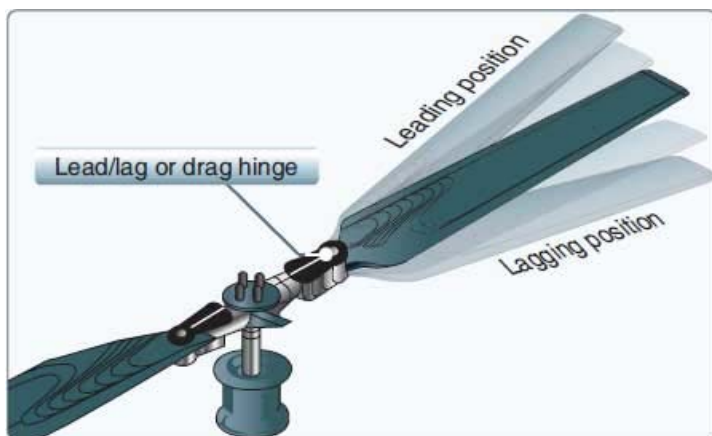


2.多旋翼操控和评价

□ 多旋翼的评价

(2) 局限性

2) 在大载重下，桨叶上下挥舞会导致刚性大的桨很容易折断



来源<http://www.danubewings.com/fully-articulated-rotor-system/>

直升机通过增加铰链结构



2.多旋翼操控和评价

□ 多旋翼的评价

(2) 局限性

总的来说，和相同尺寸的四旋翼相比，VC200在可靠性、维护性、续航性和承载性方面没有优势，它只是原尺寸飞机的一个折衷。

因此，多旋翼该方式不宜推广到大尺寸，改进方式如
Volocopter VC200



(a) 正视图

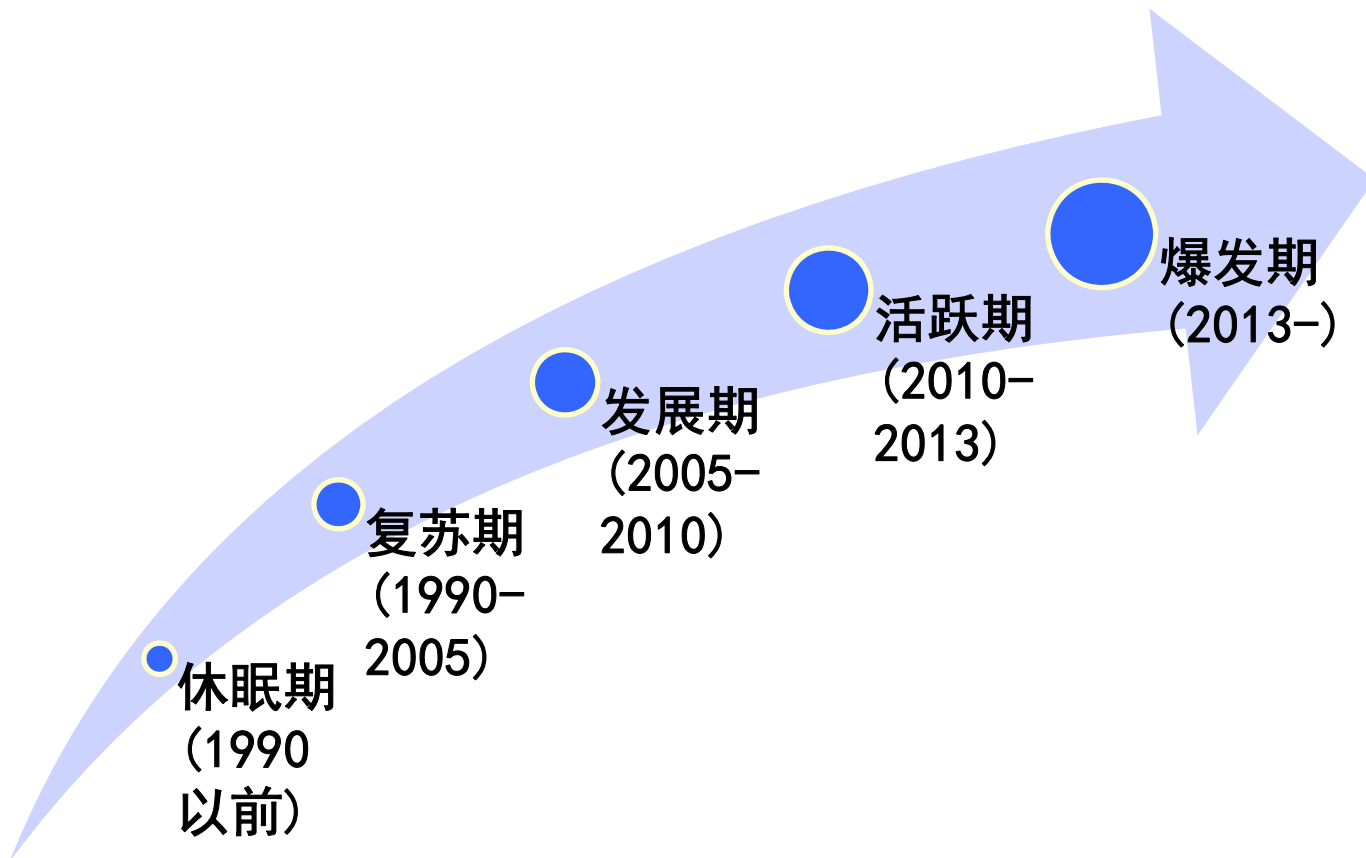


(b) 拆解图

图1.15: Volocopter VC200



3.多旋翼技术发展历史





3.多旋翼技术发展

□ 休眠期(1990以前)

早在1907年的法国，在查尔斯·里歇（Charles Richet）教授的指导下，布雷盖（Breguet）兄弟进行了他们的旋翼式直升机的飞行试验，这是记录的最早构型。因为设计不切实际，只飞了1.5m，随后落下。

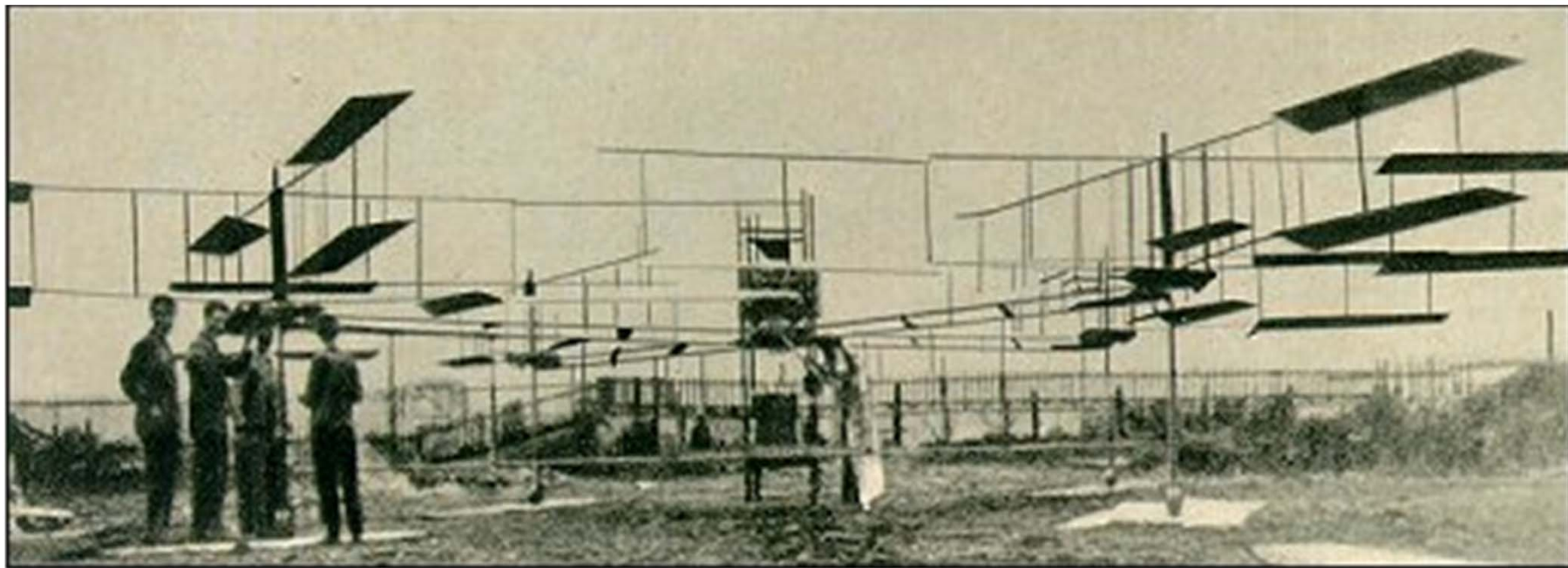


图1.16: Breguet-Richet Gyroplane No.1



3.多旋翼技术

艾蒂安·奥米西恩 (Etienne Oemichen) 于1920年开始设计多旋翼设计，第一次试飞失败；经过重新设计之后，于1923年实现了起飞并创造了当时直升机领域的世界纪录：该直升机首次实现了14分钟的飞行时间。

□ 休眠期(1990以前)

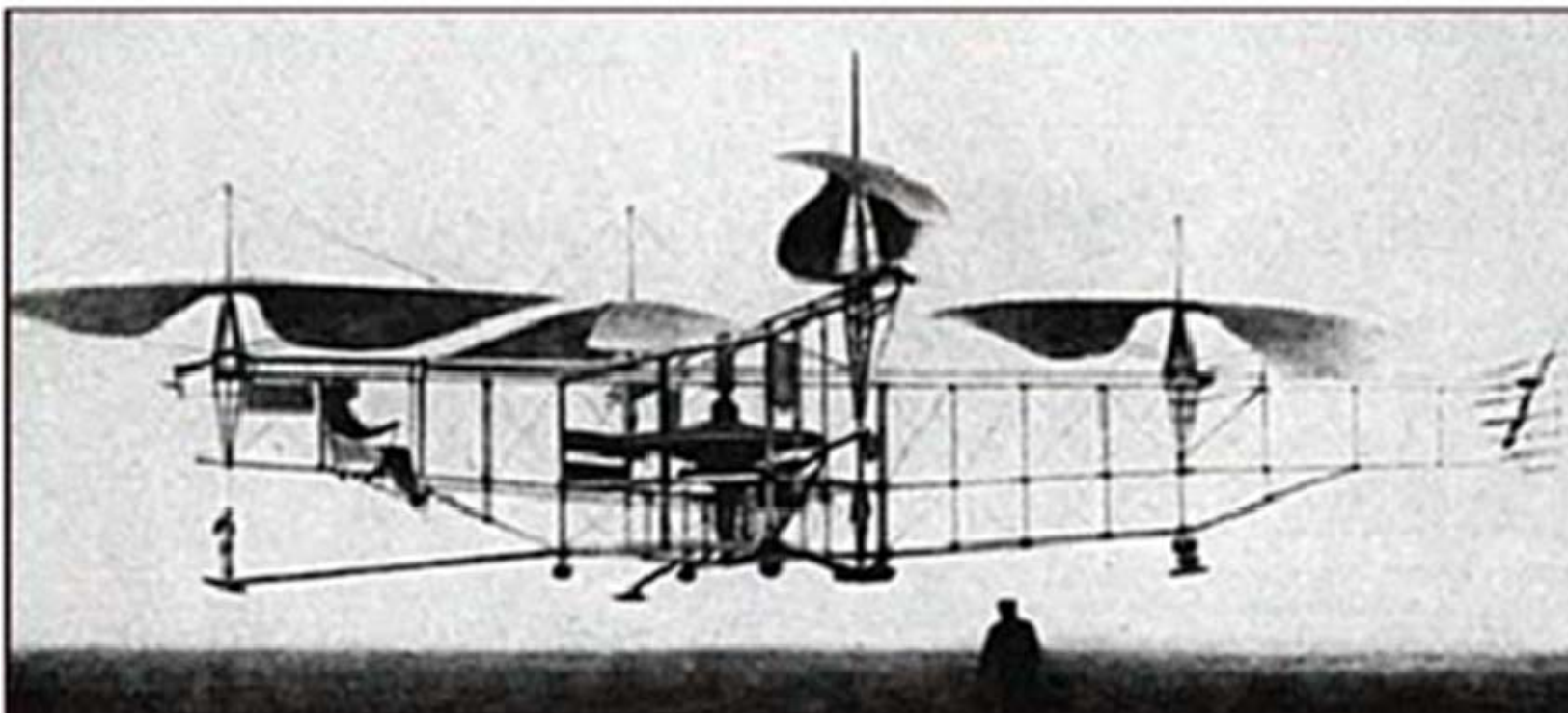


图1.17: Oemichen No.2



3.多旋翼技术

□ 休眠期(1990以前)

1921年 乔治·波札特 (George De Bothezat) 在美国俄亥俄州西南部城市代顿的美国空军部建造了另一架的大型四旋翼直升机，这架四旋翼飞机除了飞行员外还能承载3个人，原本期望的飞行高度是100米但是最终只飞到5米的高度。主要原因是发动机性能不行。

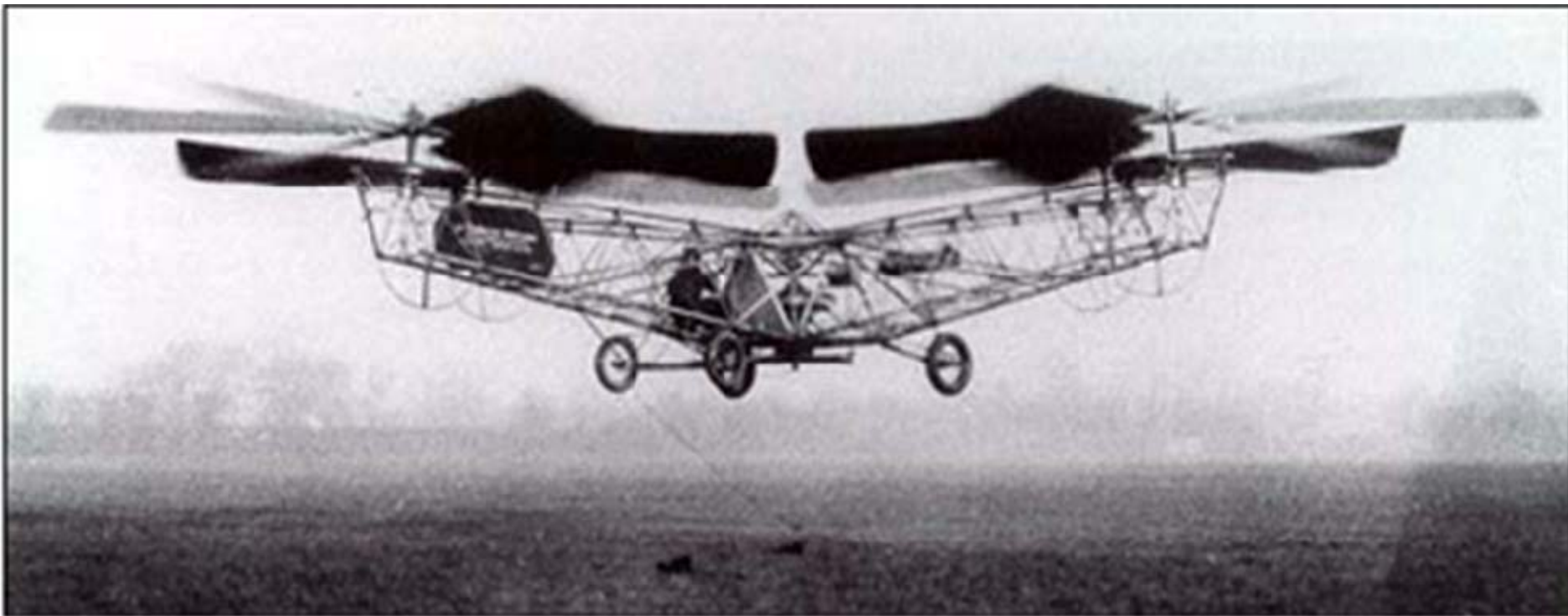


图1.17: De Bothezat 直升机



3.多旋翼技术发展

1956年，马克·阿德曼·卡普兰（Marc Adman Kaplan）设计的第一架真正的四旋翼飞行器Convertawings Model “A”。试飞取得巨大成功，这架飞机重达1吨，依靠两个90马力的发动机实现悬停和机动。

□ 休眠期(1990以前)



图1.18: Convertawings Model “A”



3.多旋翼技术发展

在20世纪50年代，美国陆军继续测试各种垂直起降方案。VZ-7虽然相对稳定，但是它未能达到军方对高度和速度的要求，该计划并没有得到更进一步的推行。在此之后的30年内，多旋翼飞行器没有取得太大的进展，获得的关注也非常少。

□ 休眠期(1990以前)

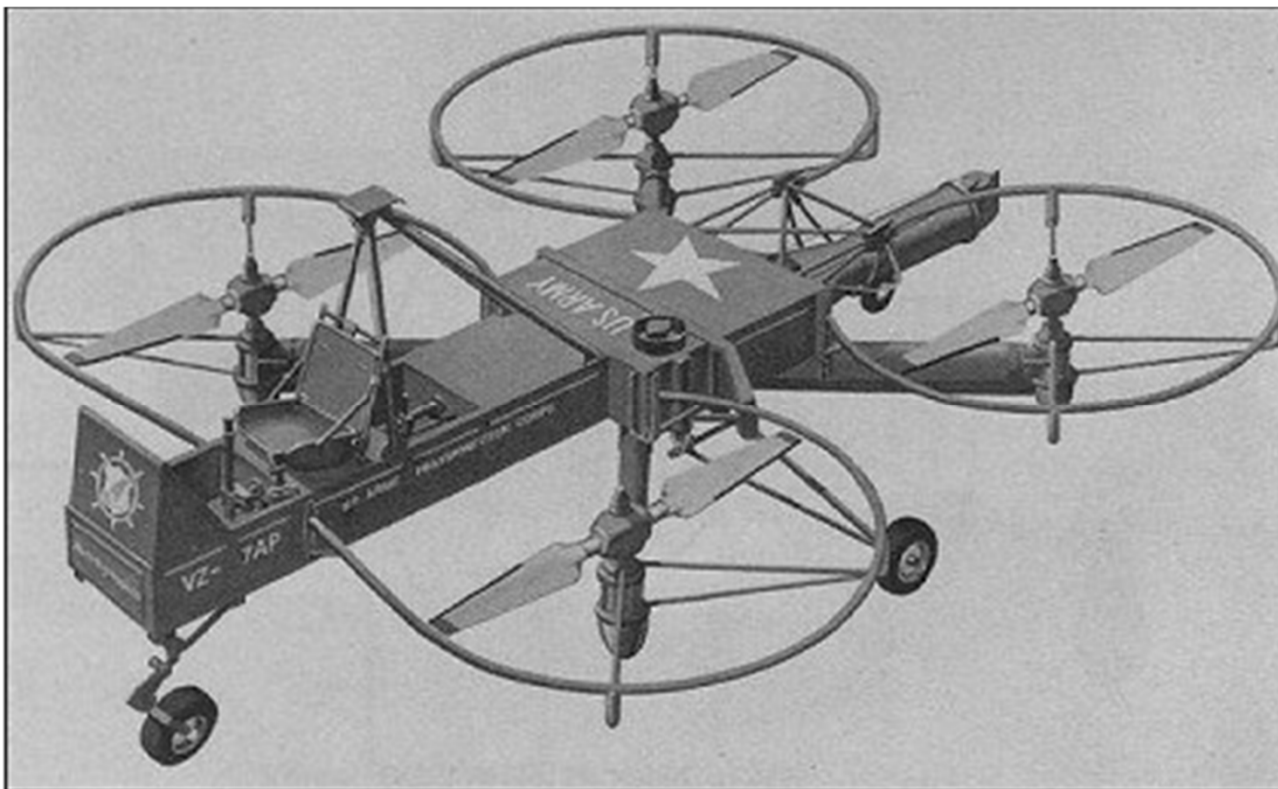


图1.19: Curtiss-Wright VZ-7



3.多旋翼技术发展历史

□ 复苏期(1990-2005)

(1) 产品方面

随着四旋翼飞行器的概念逐渐偏离军事用途，它开始通过遥控玩具市场走近消费者。



(a) Gyro Saucer 1



(b) Roswell Flyer



(c) Silverlit X-UFO

图1.20: 复苏期的多旋翼

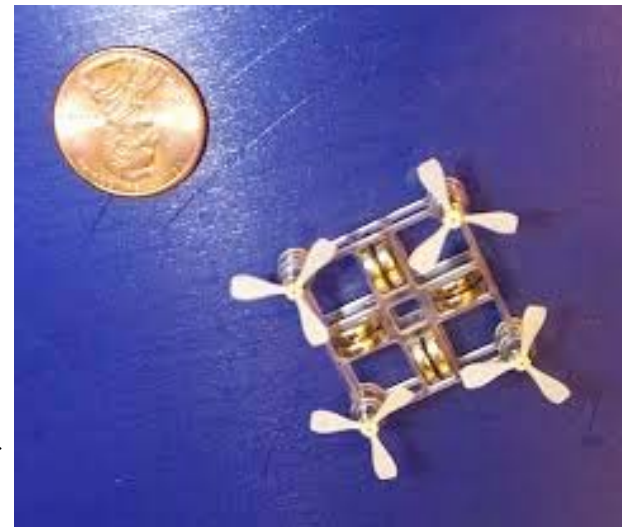


3.多旋翼技术发展历史

□ 复苏期(1990-2005)

(2) 学术方面

- 几克重的MEMS惯导系统已经被研制出来
- 学术界开始研究建模和控制
- 2005年左右，真正稳定的多旋翼无人机自动控制器才被制作出来



Mesicopter



3.多旋翼技术发展历史

□ 发展期(2005-2010)

(1) 产品方面

德国Microdrones GmbH公司于2005年成立，并于2006年4月推出第一代产品Md4-200，10年推出的Md4-1000四旋翼。美国Draganflyer公司在2004年推出Draganflyer系列。这些产品在商业市场取得了巨大成功。

可以说，德国在这个阶段起到了主导作用。



(a) Md4-200



(b) Draganflyer X6

图1.21: 发展期的多旋翼



3.多旋翼技术发展历史

□ 发展期(2005-2010)

(2) 学术方面

- 越来越多的学术研究人员开始研究多旋翼，自己搭建四旋翼，验证算法，特别是姿态控制算法
- 个别研究者基于商业四旋翼+动作捕捉系统开发验证环境

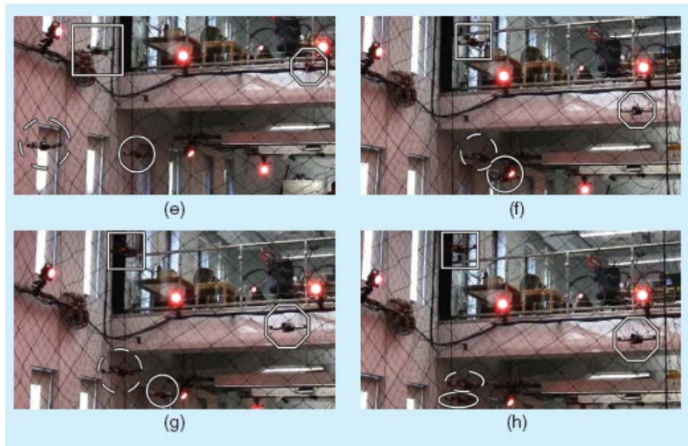


(a)



(b)

Real-Time Indoor Autonomous Vehicle Test Environment, MIT



GRASP Multiple Micro-UAV Test Bed, UPENN



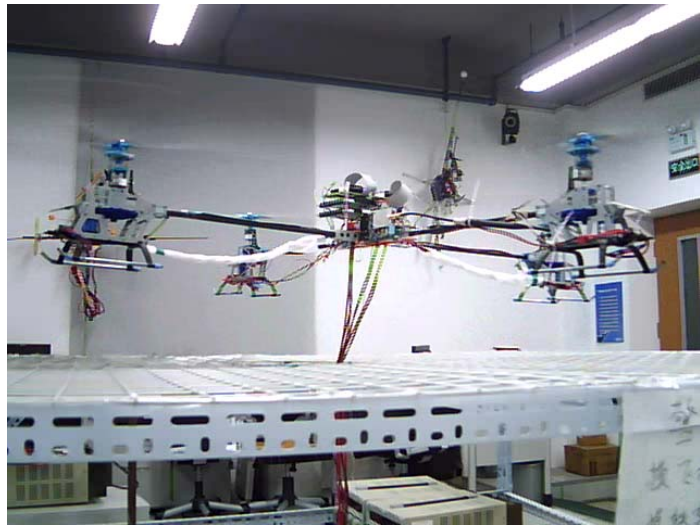
3.多旋翼技术发展历史

□ 发展期(2005-2010)

(2) 学术方面



我们实验室于2008年左右的多旋翼工作





3.多旋翼技术发展历史

□ 活跃期(2010-2013)

(1) 产品方面

- 2010年，法国的派诺特公司与学校共同合作，经过6年努力（2004-2010），推出消费级的AR. Drone四旋翼玩具，非常成功，它的技术和理念也十分领先。
- 2013年左右，大疆推出小精灵Phantom一体机



(a) AR. Drone 1.0



(b) Phantom

图1.18: 活跃期的多旋翼



3.多旋翼技术发展历史

□ 活跃期(2010-2013)

(2) 学术方面

- 2012年2月，宾夕法尼亚大学的韦杰·库玛教授在TED上做出了四旋翼飞行器发展历史上里程碑式的演讲，展示了四旋翼的灵活性以及编队协作。
- 2012年，Robotics & Automation Magazine, IEEE, Aerial Robotics and the Quadrotor的专刊，比如文章
- 多旋翼开源自驾仪增多



3.多旋翼技术发展历史

□ 活跃期(2010-2013)

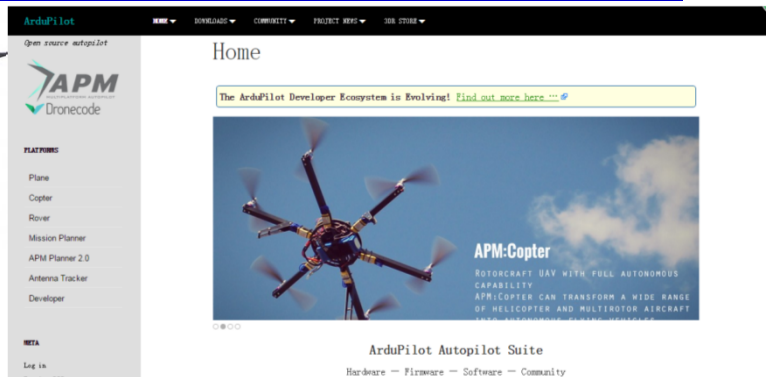
开源项目 (Open-Source Projects)	网址 (Web site URL)	开源项目	网址 (Web site URL)
ArduPilot	http://ardupilot.com	Taulabs	http://forum.taulabs.org/
Openpilot	http://www.openpilot.org/	Flexbot	http://www.flexbot.cc/
Paparazzi	http://paparazziuav.org	Dronecode(开源无人机航空操作系统)	https://www.dronecode.org/
Pixhawk	https://pixhawk.ethz.ch/	Percepto(无人机开源视觉平台)	http://www.percepto.co/
Mikrokopter	http://www.mikrokopter.de	Parrot API(开放SDK)	https://projects.ardrone.org/embedded/ardrone-api/index.html
KKmulticopter	http://www.kkmulticopter.kr/	3DR DRONEKIT(SDK)	http://www.dronekit.io/
Multiwii	http://www.multiwii.com/	DJI DEVELOPER(SDK)	http://dev.dji.com/cn
Aeroquad	http://www.aeroquadstore.com/	DJI MATRICE 100+ DJI Guidance	https://developer.dji.com/cn/matrice-100/
Crazyflie	https://www.bitcraze.io/category/crazyflie/	SDK for XMission(SDK)	http://www.xaircraft.cn/en/xmission/developer
CrazePony (国内)	http://www.crazepony.com/	EHANG GHOST SDK(SDK)	http://dev.ehang.com/
圆点博士 (国内)	http://www.etootle.com/		
匿名飞控 (国内)	http://www.anotc.com/		
Autoquad	http://autoquad.org/		
MegaPirate	http://megapiratex.com/index.php		
Erlrobot	http://erlerobotics.com/		



3.多旋翼技术发展历史

□ 爆发期(2013-)

(1) 产品方面



- 大疆小精灵Phantom一体机得到持续关注
- 连线主编C. Anderson于2012年年底当任3D Robotics公司的CEO，连续推出Iris、X8+、Solo等四旋翼飞行器。同时，该公司维护和支持了APM开源多旋翼的软硬件升级，以及网站建设和维护
- 2013年底，3D Robotics公司牵手苏黎世联邦理工学院的PX4开源飞控开发团队，共同推出Pixhawk硬件
- 同样在2013年底，互联网巨头亚马逊发布的采用四旋翼送快递的视频，拉近了多旋翼飞行器与普通消费者之间的距离



3.多旋翼技术发展历史

□ 爆发期(20



(1) 产品方面 (2013年8月-2015年9月)

飞机型号	公司	发布时间	国家	特点
Spiri	Patrick Edwards-Daugherty	2013.8	加拿大	基于Ubuntu的可编程无人机
Stingray500	Curtis Young Blood	2013.12	美国	全球首款量产的四轴可变桨距飞行器
AR.Drone 2.0	Parrot	2013.12	法国	智能终端控制、无GPS能保持悬停
AirDog	Helico Aerospace Industries	2014.6	拉脱维亚	可折叠式、不需要智能手机进行控制，会跟着你全天候的待命拍摄
Rolling Spider	Parrot	2014.7	法国	体积小而轻，配备了一个“车轮”，可以实现在地上跑、爬墙等
IRIS+	3D Robotics	2014.9	美国	一键3D扫描建模，自动跟踪、自动轨迹飞行拍摄
Nixie	Fly nexie	2014.11	美国	世界上第一款可穿戴无人机（概念阶段）
GHOST 1.0	EHANG	2014.11	中国	纯手机控制，自动跟随
Mind4	AirMind	2014.11	中国	世界上首款基于安卓系统的无人机
inspire 1	DJI	2014.11	中国	变形收起起落架
Bebop	Parrot	2014.12	法国	Bebop是基于AR.Drone的全面升级
Vertex VTOL	ComQuest Ventures	2015.1	波多黎各	将多旋翼与固定翼飞行器的各种优势进行有机组合
Skydio	Skydio	2015.1	美国	只用普通摄像头，就能实现自主导航和冲突避免能力（尚在原型阶段）
Steadidrone Flare	Steadidrone	2015.1	捷克	高强度的碳纤维机身、防水功能，本身还支持折叠
Airborg H61500	Top Flight Technologies	2015.3	美国	混合动力



3.多旋翼技术发展历史

□ 爆发期(2013-)



(1) 产品方面 (2013年8月-2015年9月)

飞机型号	公司	发布时间	国家	特点
Splash Drone	Urban Drones	2015.3	美国	防水设计, 可以停留在水面上
SOLO	3D Robotics	2015.4	美国	集最先进的技术于一身, 提高航拍体验
Phantom 3	DJI	2015.4	中国	集成了高清图传、视觉定位、4K摄像机等先进技术
XPlanet	XAIRCRAFT	2015.4	中国	智能规划航线、智能喷洒系统、智能电池管理等
Phenox2	Ryo Konomura、Kensho Miyoshi	2015.4	日本	一款可编程的无人机, 足够小、重量轻, 可在人手上起飞降落
CyPhy LVL1	CyPhy Works	2015.4	美国	水平飞行拍摄时机身不会倾斜
Lily	Lily	2015.5	美国	可手抛起飞、自动跟随、防水
PhoneDrone	xCraft	2015.5	新西兰	PhoneDrone其实就是一个外骨骼框架, 智能手机镶嵌到框架中组装为自动飞行的四翼无人机
Yeair!	airstier	2015.6	德国	油电混合动力
Tayzu	Tayzu Robotics	2015.7	美国	全程自动化处理的无人机系统
Fotokite Phi	Perspective Robotics AG	2015.8	瑞士	可折叠, 无需等待GPS锁定或校准
独角兽X	FPVStyle	2015.8	中国	前飞速快
Micro Drone3.0	Extreme Fliers	2015.8	英国	3D虚拟情景的技术
Feibot	Feibot	2015.9	中国	基于智能手机平台
Snap	Vantage Robotics	2015.9	美国	由于采用模块化的设计, 模块之间采用磁性连接器连接
Flybi	Advance Corporation Robotix	2015.9	美国	配备手表型遥控器, 采用LCD显示屏, 单操作杆和转盘配合控制机体, 可以通过随机的VR眼镜实现第一视角飞行。并且可以自动换电池。



3.多旋翼技术发展历史

□ 爆发期(2013-)

(2) 学术方面

- 多旋翼的研究更偏向**智能化、群体化**。
- 2013年，苏黎世联邦理工学院的拉斐尔·安德列教授在TEDGlobal的机器人实验室展示了四旋翼的惊人运动机能。
- 《自然》发表综述文章分析和展望了小型自主无人机在民用领域的科学和技术。

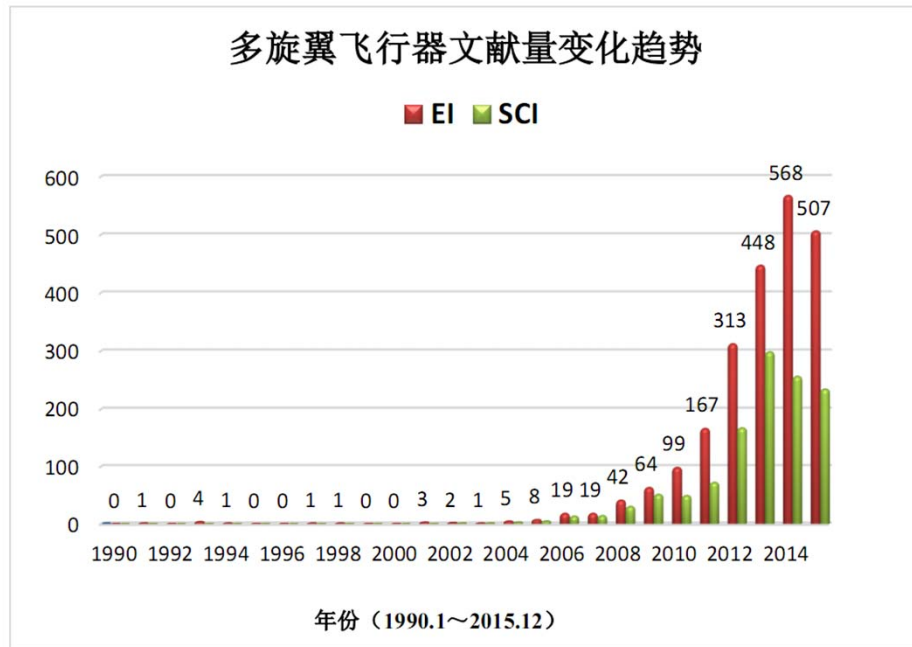


图1.19: 多旋翼文献数量变化趋势



3.多旋翼技术发展历史

□ 小结

(1) 时势造英雄，多旋翼是时间的产物。

硬件小型化、计算能力越来越强、电机功率提升、电池能量密度提升、智能手机、Gopro运动相机、活跃的社交网络

(2) 一体机改变了体验，使飞行简单化。

AR.Drone、大疆小精灵Phantom



4.本门课的安排

□ 目的

本门课程讲授多旋翼设计、动态模型建立、状态估计、控制和决策等方面的基础知识。具有两大特点：“基础性”和“系统性”。

(1) 基础性

本课程力求绝大部分多旋翼涉及的内容能够自包含，使得具有自动化专业本科知识的学生就能够听懂这门课。

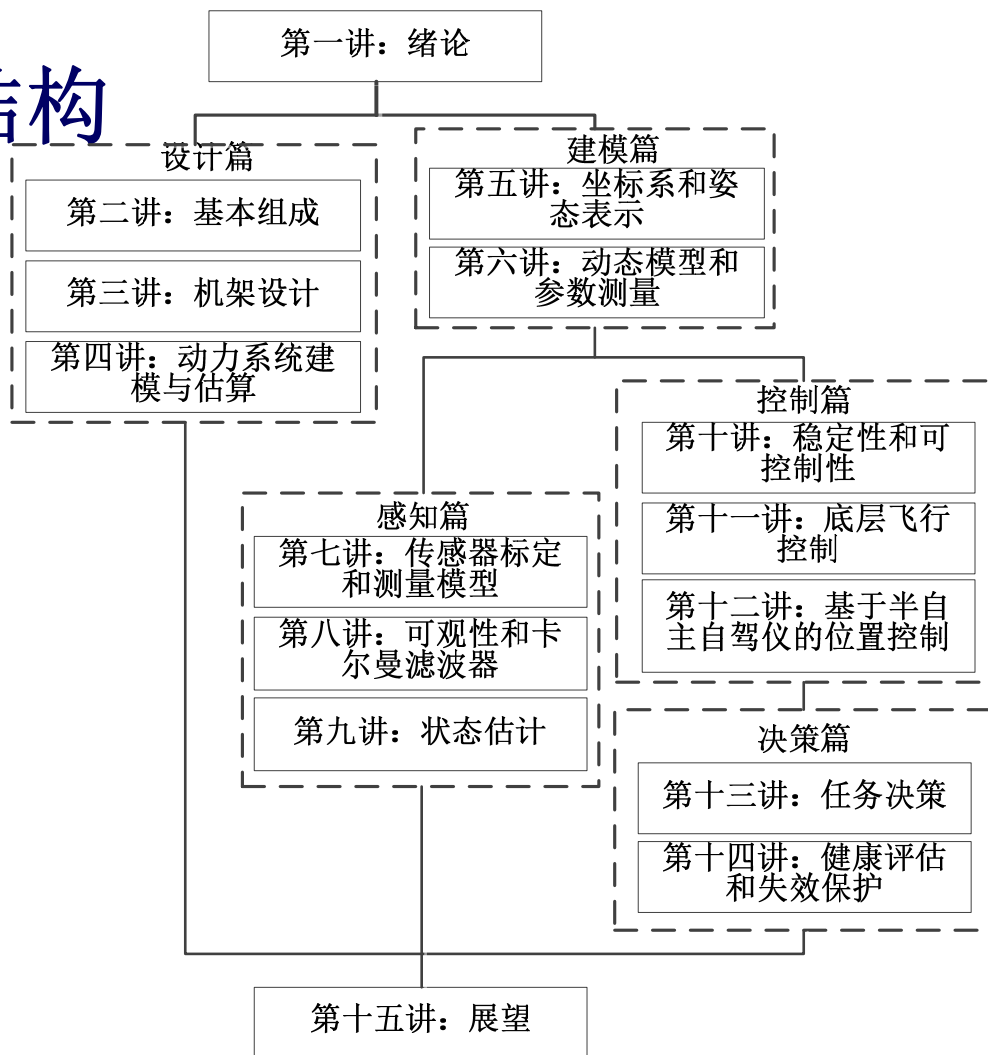
(2) 系统性

本课程目的是介绍多旋翼飞行器系统性的全貌，而不仅仅是某一个技术点。本课程通过多旋翼例子，将散落的知识实例化。



4.本门课的安排

□ 结构



(1) 仅对多旋翼设计感兴趣的同 学，可参加第一讲、设计单元和第十五讲课程；

(2) 仅对多旋翼感知感兴趣的同 学，可参加第一讲、模型单元、感知单元和第十五讲课程；

(3) 仅对对多旋翼控制算法感兴趣的同 学，可参加第一讲、模型单元、控制单元、决策单元和第十五讲课程。



资源

(1) 可靠飞行控制研究组主页课程中心(全部课件下载)

<http://rfly.buaa.edu.cn/course>

(2) 关注可靠飞行控制研究组公众号 buaarfly(文章、资讯等)

(3) 多旋翼设计与控制交流QQ群:183613048

(4) 视频课程(MOOC)同步发布, 网易云课堂搜索 “多旋翼”

<http://study.163.com/course/introduction/1003715005.htm>

(5) 同名中文书本教材《多旋翼飞行器设计与控制》即将在电子工业出版社出版, 敬请期待

(6) 有疑问可联系课程总助教戴训华, 邮箱: dai@buaa.edu.cn



致谢

感谢控制组所有同学



为本门课程准备作出的贡献。



谢谢

更详细的内容可以参考我们的教材：《多旋翼飞行器设计与控制》，电子工业出版社。

中文版目前在亚马逊、当当、京东、天猫（电子工业出版社旗舰店）等网站有售。

英文版本 *Introduction to Multicopter Design and Control*，在Springer出版，在亚马逊有售。