

多旋翼飞行器：从原理到实践

第一讲 绪论

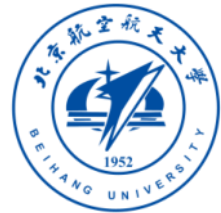
全权



北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY



可靠飞行控制研究组
RELIABLE FLIGHT CONTROL GROUP



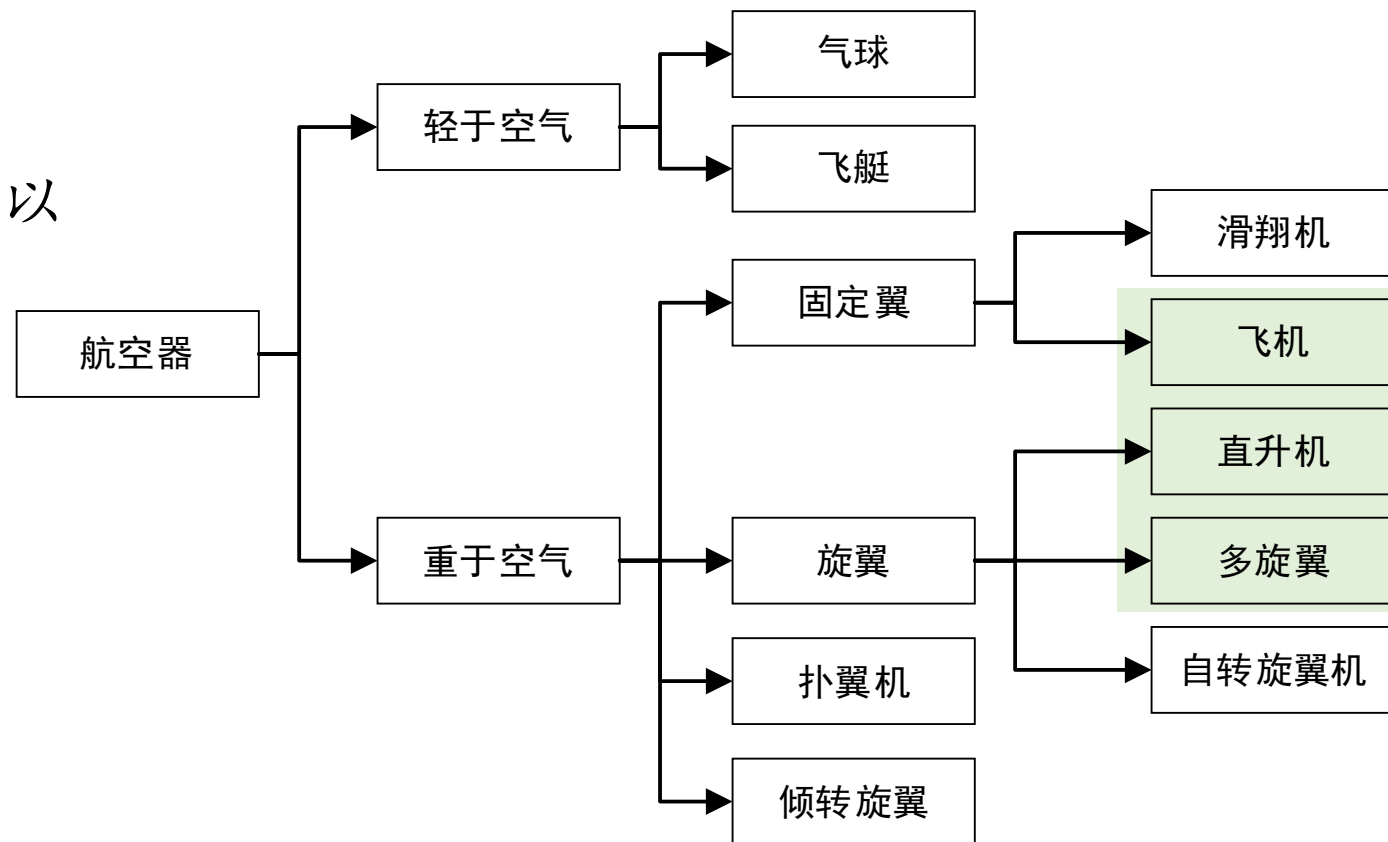
1. 基本概念
2. 多旋翼遥控原理和性能评估
3. 多旋翼发展历史
4. 本书的目的和写作结构

1. 基本概念

常见飞行器分类



- 在地球大气层内、外飞行的器械称为**飞行器**。
- 按飞行环境和工作方式的不同，可以把飞行器分为：**航空器、航天器、火箭和导弹**。
- 其中**航空器**是指在**大气层内飞行**的飞行器，其依靠**空气的静浮力或靠与空气相对运动**产生的空气动力升空飞行。航空器常见种类如图所示。



1. 基本概念

常见飞行器分类



(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

1. 基本概念

常见飞行器分类



(a) 固定翼



(b) 直升机



(c) 多旋翼

(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

(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



各种多旋翼

1. 基本概念

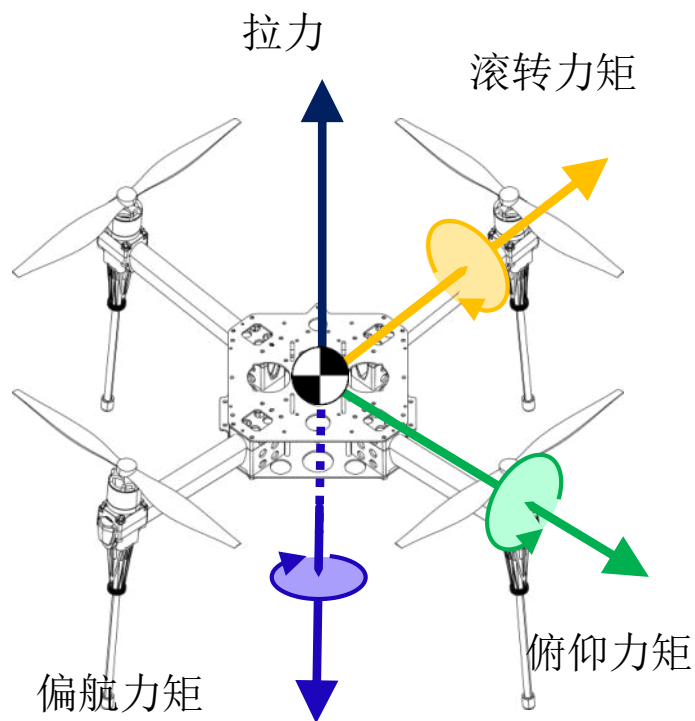
常见飞行器分类



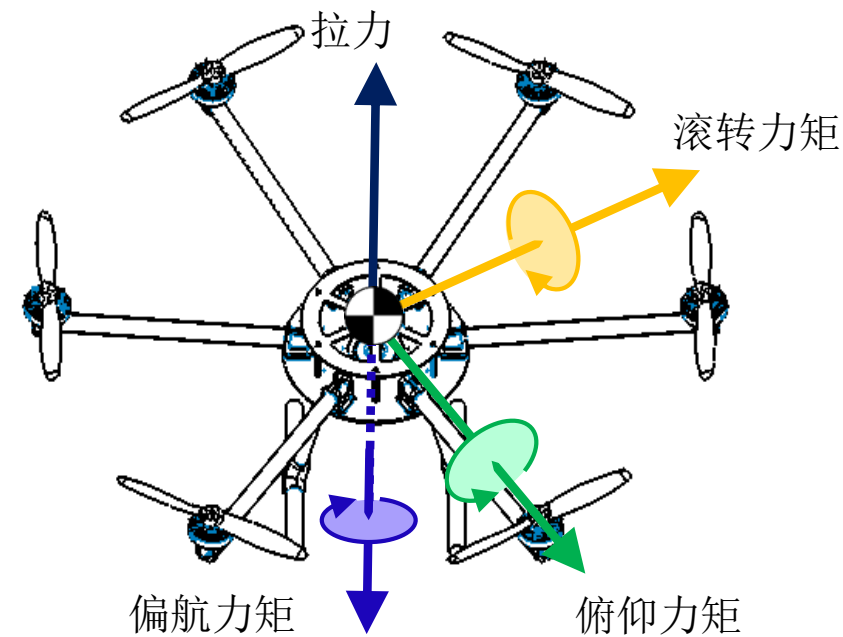
(3) 多旋翼

四旋翼和六旋翼有何分别？

- 无本质区别，拉力和三轴力矩
- 六旋翼控制分配更灵活



(a) 四旋翼



(b) 六旋翼

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

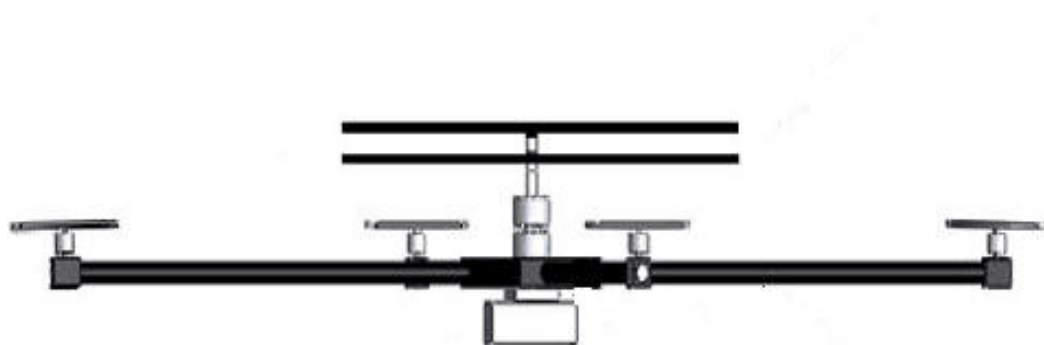
复合式直升机从悬停模态转换到前飞模态示意图

1. 基本概念

常见飞行器分类



(4) 复合飞行器



复合多旋翼

1. 基本概念

无人驾驶飞机和航模



(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，军事或民用领域常见的无人机包括无人直升机、无人飞艇、无人固定翼飞机。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。”在整个飞行过程中，它必须位于飞行器操控人员的视距内。

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

1. 基本概念

飞行原理

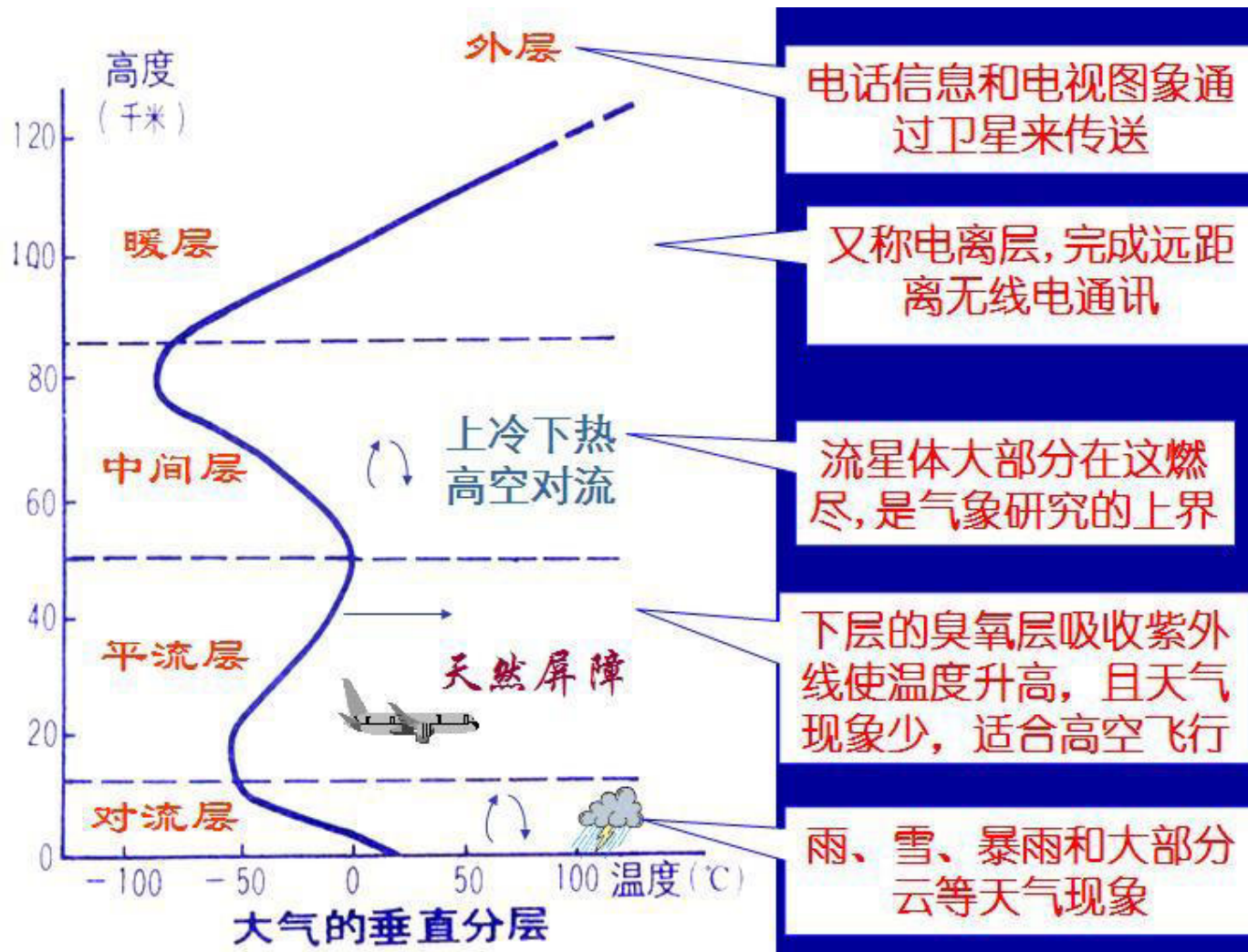
(1) 大气飞行环境

大气的绝大部分质量集中在

对流层和平流层这两层大气内，

目前大部分的航空器也只在这两

层内活动。



1. 基本概念

飞行原理

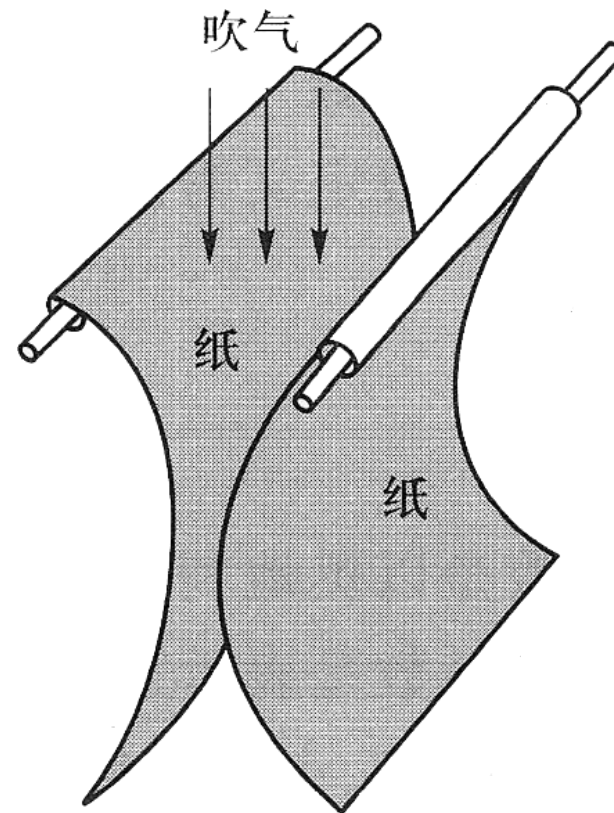


(2) 伯努利原理



伯努利定理反映流体中流速与流体压力之间的关系，是瑞士物理学家**丹尼尔·伯努利**在**1738年**发现的。伯努利定理的内容表述为：

由不可压、理想流体沿流管作定常流动时，流动速度增加，流体的静压将减小；反之，流动速度减小，流体的静压将增加。但是**流体的静压和动压之和（称为总压）始终保持不变。**



吹气实验验证伯努利原理

1. 基本概念

飞行原理

(3) 旋翼的空气动力

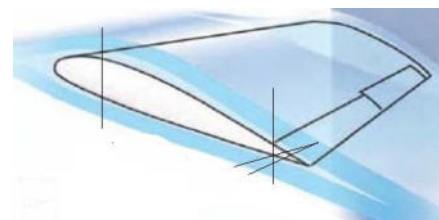
机翼“翼剖面”，通常也叫“**翼型**”，是指沿平行于飞机对称平面的切平面切割**机翼所得到的剖面**。机翼与空气有**相对运动**，进而才能产生空气动力。

- 假设翼型有一个不大的迎角，当气流流到翼型的前缘时，气流分成上下两股，分别流经翼型的上下翼面。
- 由于翼型的作用,当气流流过上翼面时流动通道变窄，气流速度增大、**压强降低**并低于前方气流的大气压；
- 气流流过上翼面时，由于翼型前端上仰，气流受到阻拦且流动通道扩大，气流速度减小**压强增大**并高于前方气流的大气压。
- 因此，在上下翼面之间就形成了一个**压强差**，从而产生了一个向上的升力。

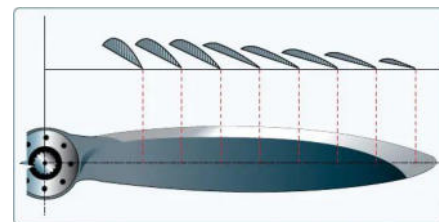
AIRFOIL TECHNOLOGY



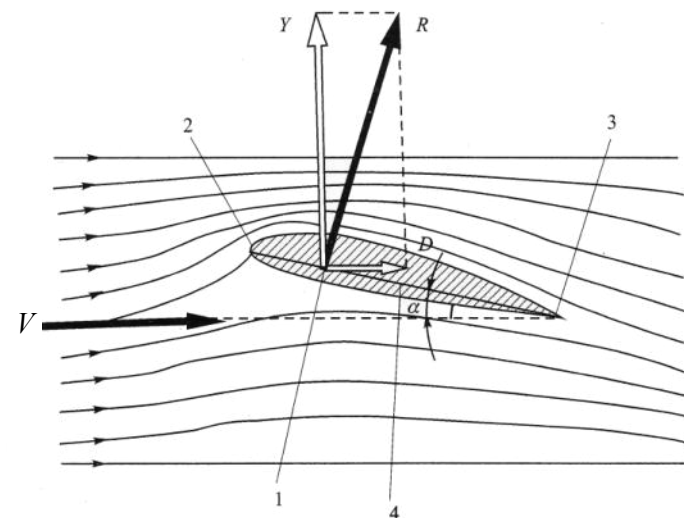
www.LearnEngineering.org
A YouTube PARTNER...



(a) 固定翼机翼截面



(b) 螺旋桨桨叶截面



1-空气动力作用点; 2-前缘; 3-后缘; 4-翼弦

(c) 翼型上的空气动力

1. 基本概念

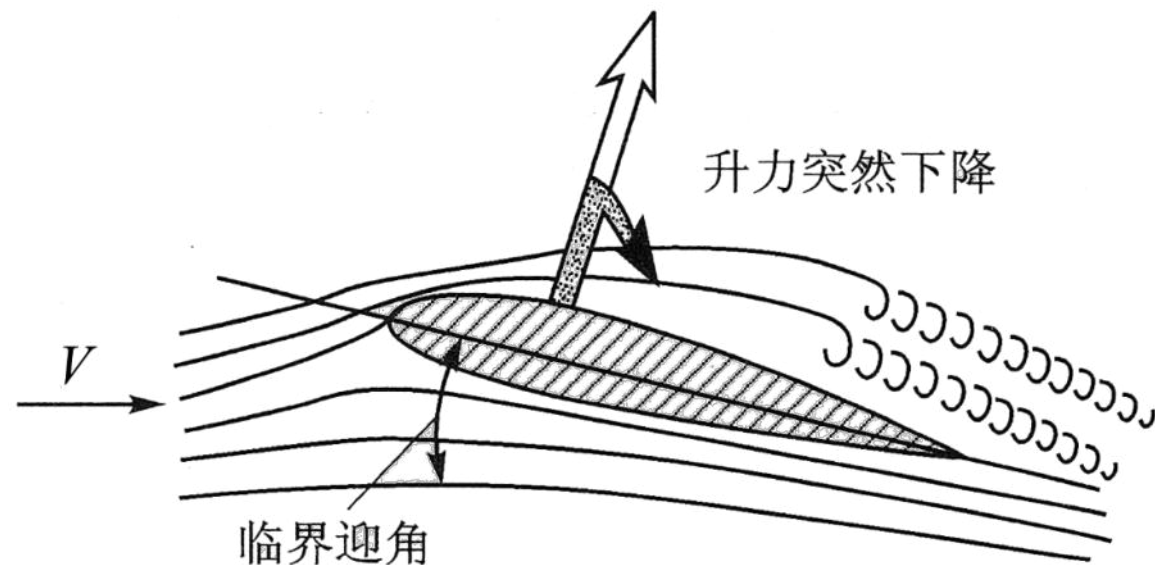
飞行原理



(3) 旋翼的空气动力

随着迎角的增大，升力也会增大，但当迎角增大到一定程度时，气流就会从机翼后缘开始分离，**尾部会出现很大的涡流区**，这时，升力会突然下降，而阻力却迅速增大，这种现象称为**“失速”**。

失速刚刚出现时的迎角叫**“临界迎角”**。
飞机不应以接近或大于临界迎角的状态飞行，否则会使飞机产生失速，甚至造成飞行事故。

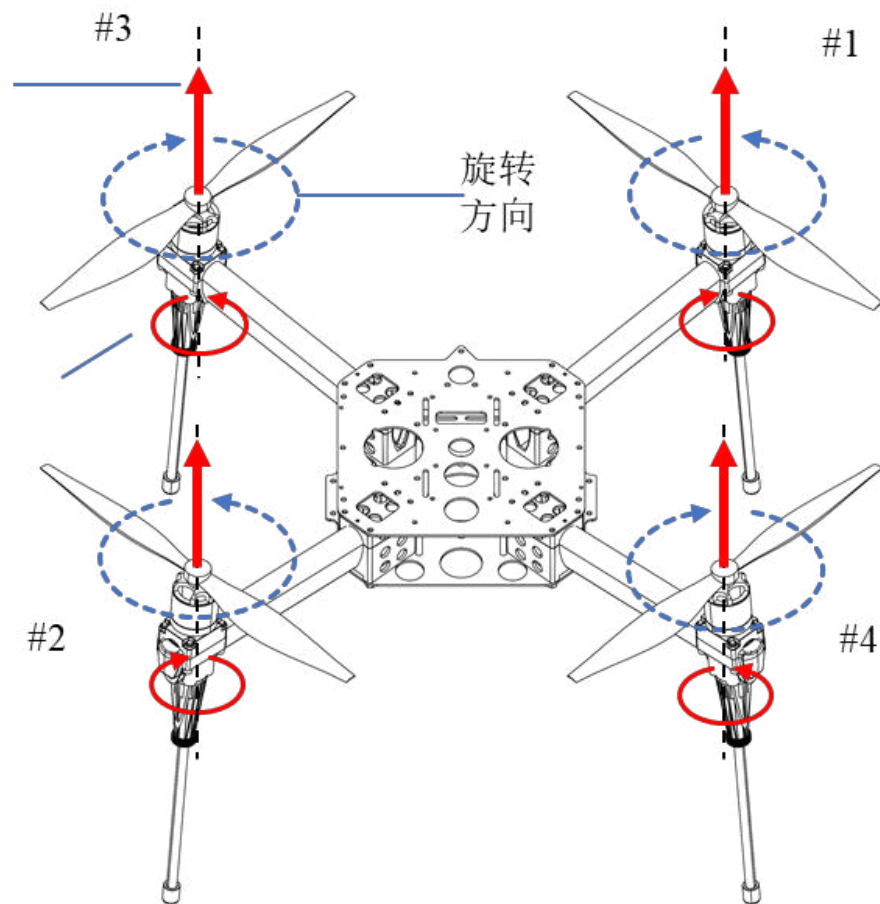


2. 多旋翼操控原理和性能评估

操控原理



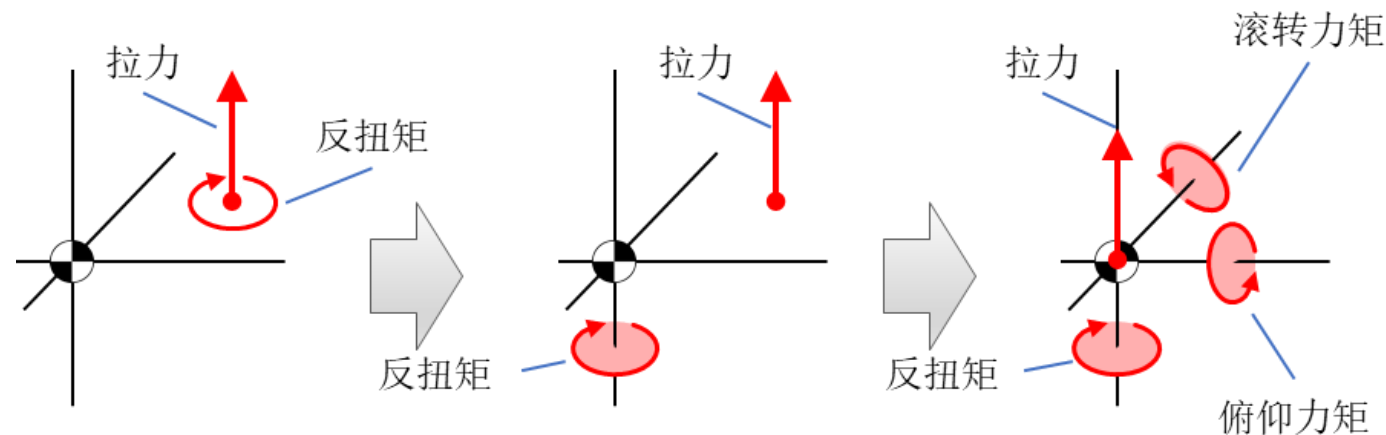
(1) 悬停



(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

2. 多旋翼操控原理和性能评估

操控原理

(1) 悬停

直升机如何抵消反扭矩?



(a) 直-9

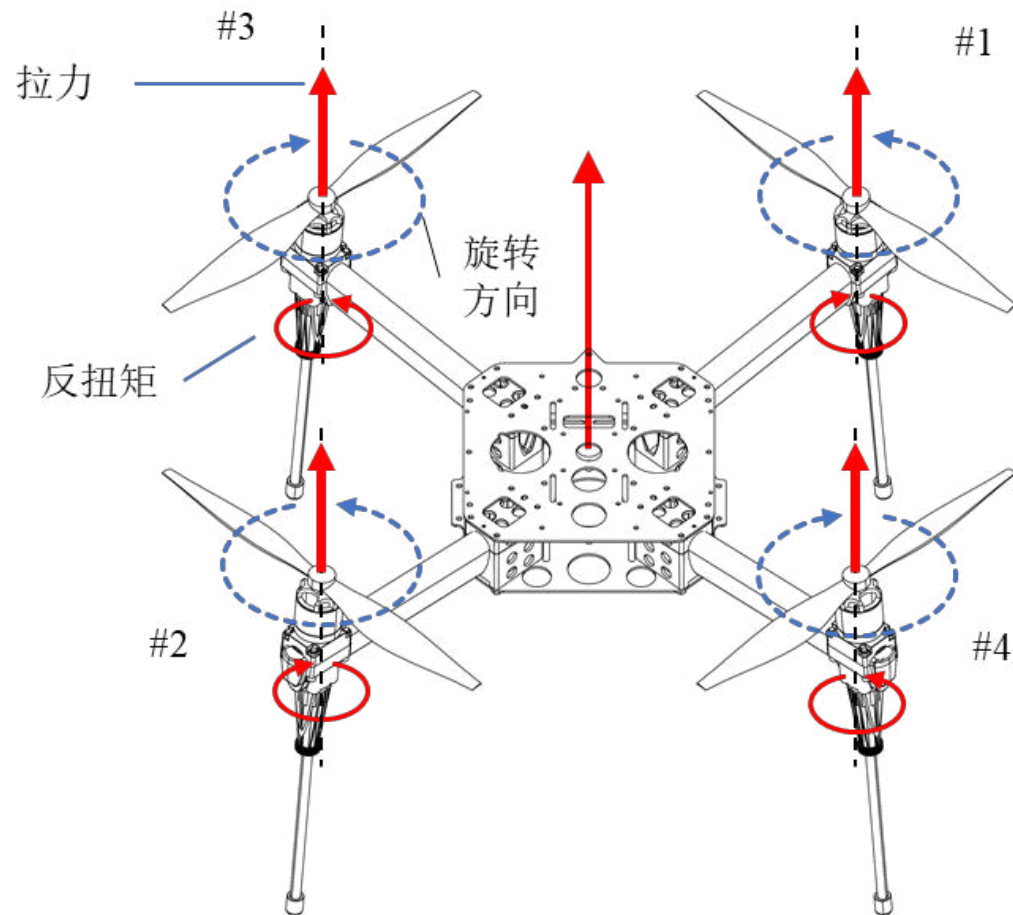


(b) 北航“海鸥”

2. 多旋翼操控原理和性能评估

操控原理

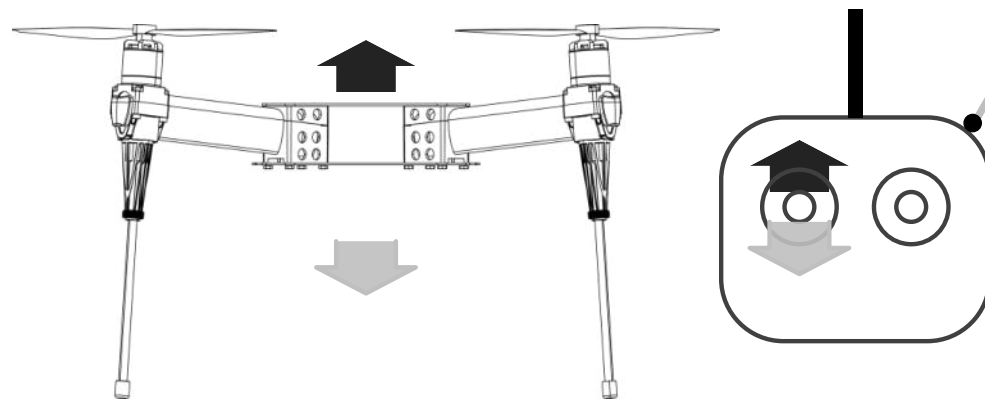
(2) 升降运动



四旋翼上飞

上升运动螺旋桨变化 (+表示增加转速)

	#1	#2	#3	#4
改变拉力	+1	+1	+1	+1

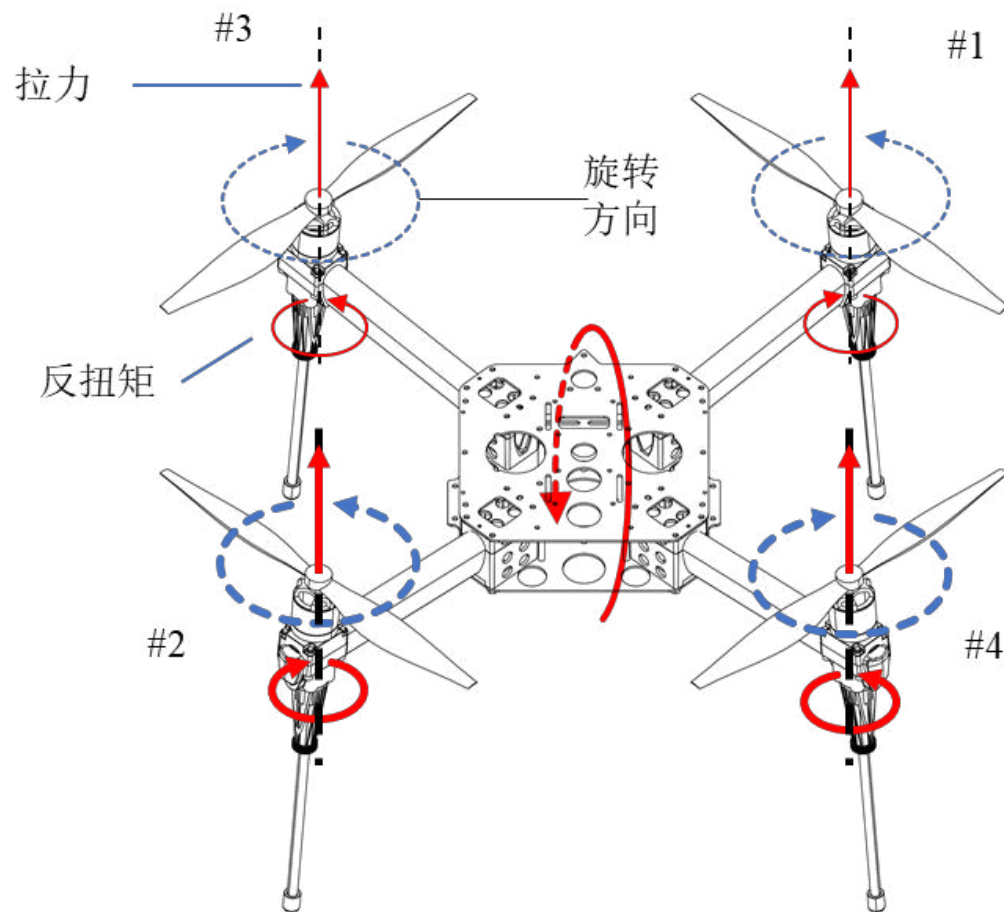


上下运动时遥控器的操作方式

2. 多旋翼操控原理和性能评估

操控原理

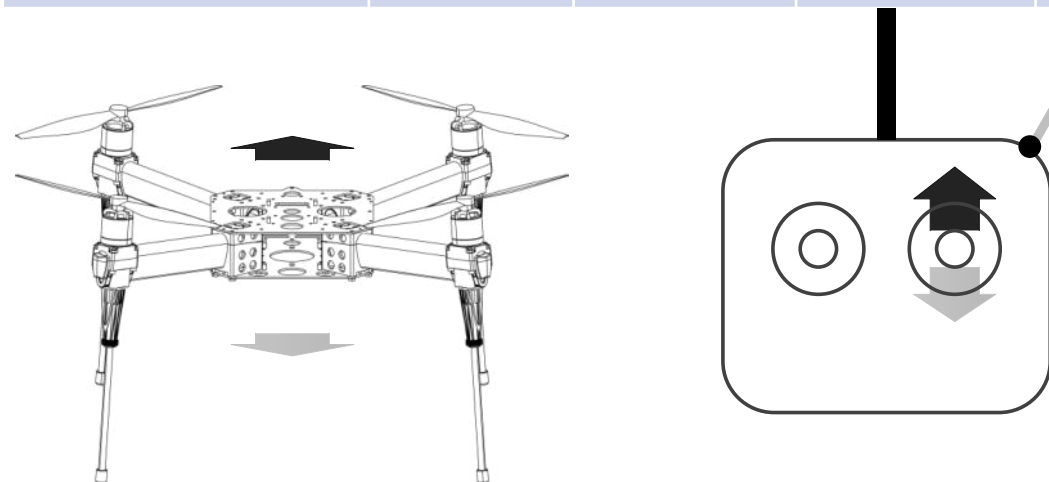
(3) 前后运动



四旋翼前飞

向前运动螺旋桨变化 (-表示降低转速)

	#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



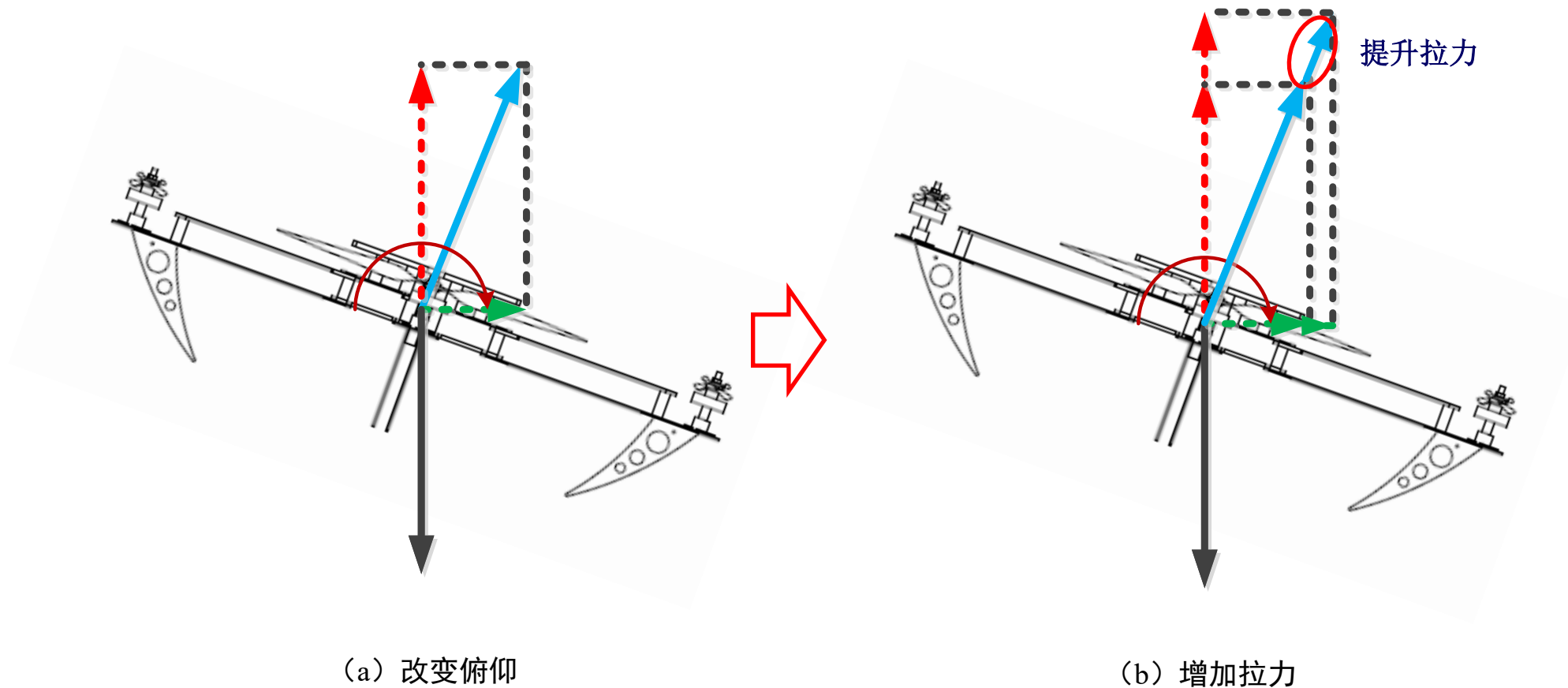
前后运动时遥控器的操作方式



2. 多旋翼操控原理和性能评估

操控原理

(3) 前后运动

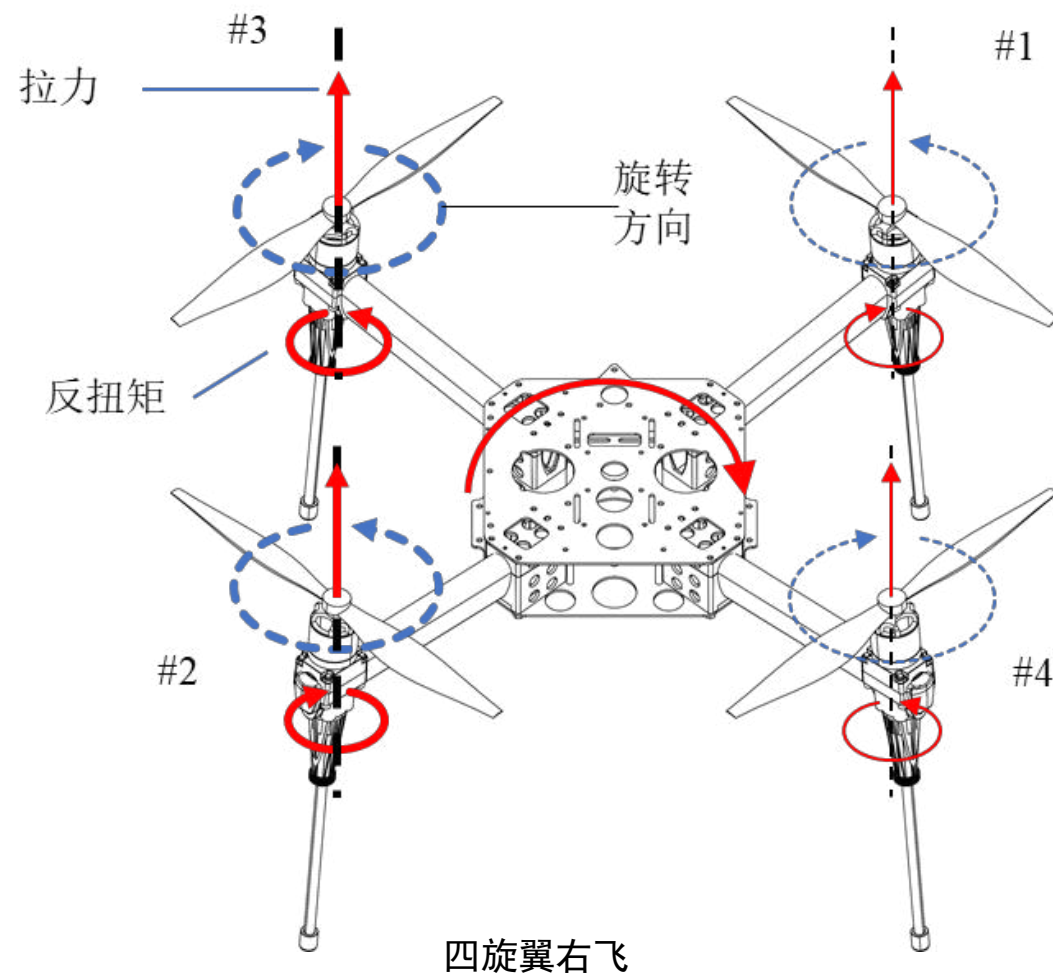


倾斜后拉力在重力方向的分量抵消不了重力，因此需要再提升拉力

2. 多旋翼操控原理和性能评估

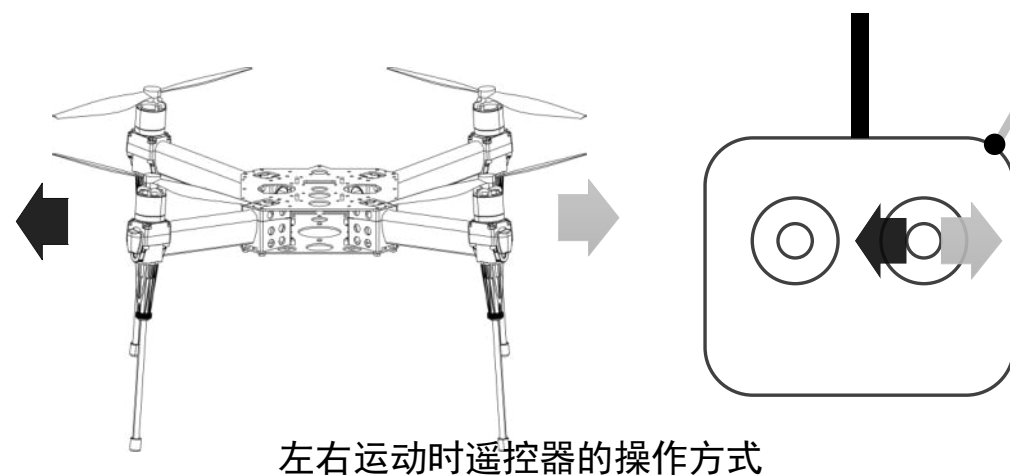
操控原理

(4) 左右运动



向右运动螺旋桨变化

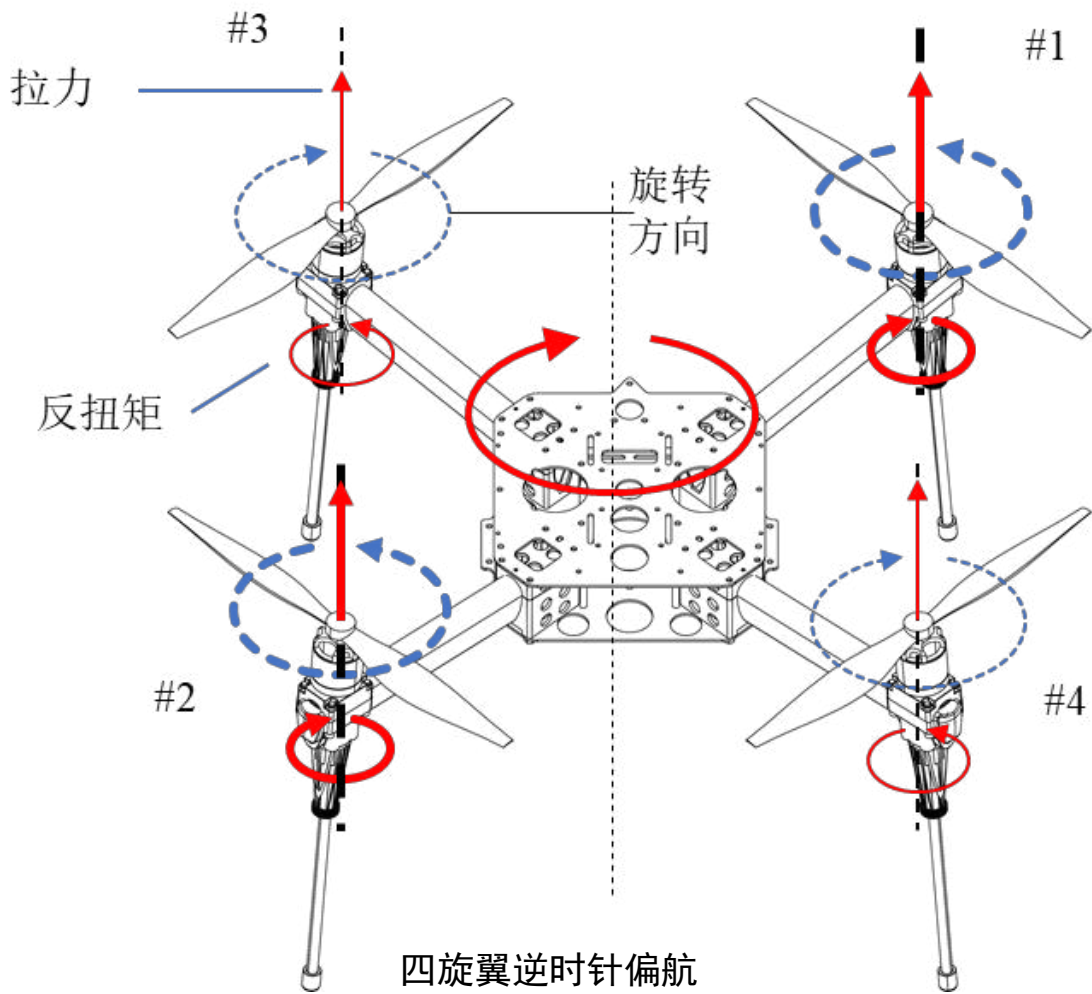
	#1	#2	#3	#4
改变滚转	-1	-1	+1	+1
增加拉力	+0.2	+0.2	+0.2	+0.2
合成	-0.8	-0.8	+1.2	+1.2



2. 多旋翼操控原理和性能评估

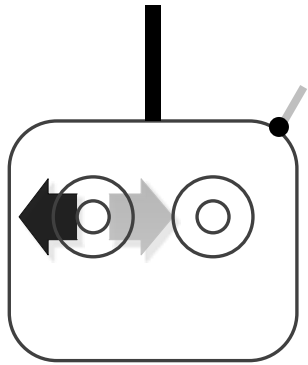
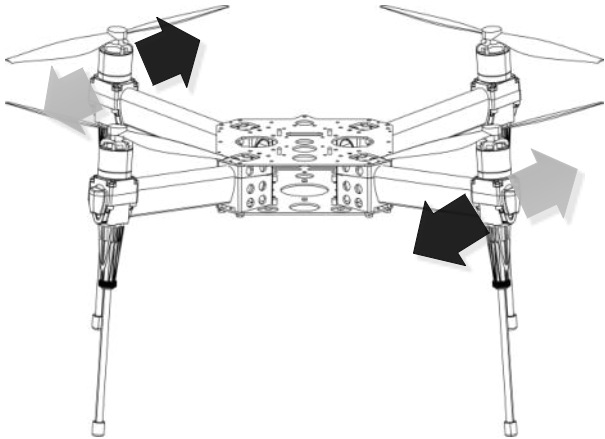
操控原理

(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



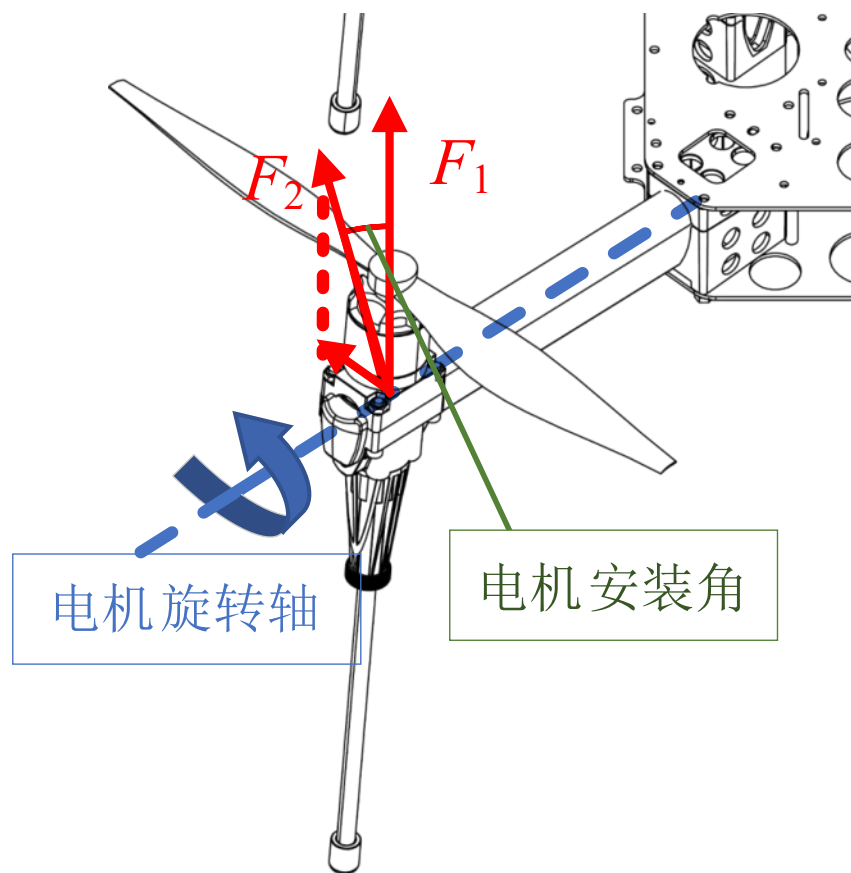
偏航运动时遥控器的操作方式



2. 多旋翼操控原理和性能评估

操控原理

(5) 偏航运动



- 工程中会通过增加电机安装角的方式增大的偏航力矩。
- 已知#2电机及螺旋桨为**逆时针旋转**，会产生使飞行器**顺时针旋转**的反扭力矩。如果将该电机按如图右图中的所示的旋转轴和旋转方向转动一个小角度，此时该旋翼产生的拉力就会在桨盘平面产生**分力**，进而产生使飞行器**顺时针旋转的偏航力矩**，推动飞行器进行偏航运动。

2. 多旋翼操控原理和性能评估

性能评估



		固定翼	直升机	多旋翼	
刚性 体验	可操控性	++	+	+++	运动相互解耦
	可靠性	++	+	+++	无机械磨损
	勤务性	++	+	+++	结构简单、模块化
	续航能力	+++	++	+	
	承载能力	+++	++	+	

刚性体验让人们选择了多旋翼

2. 多旋翼操控原理和性能评估

瓶颈



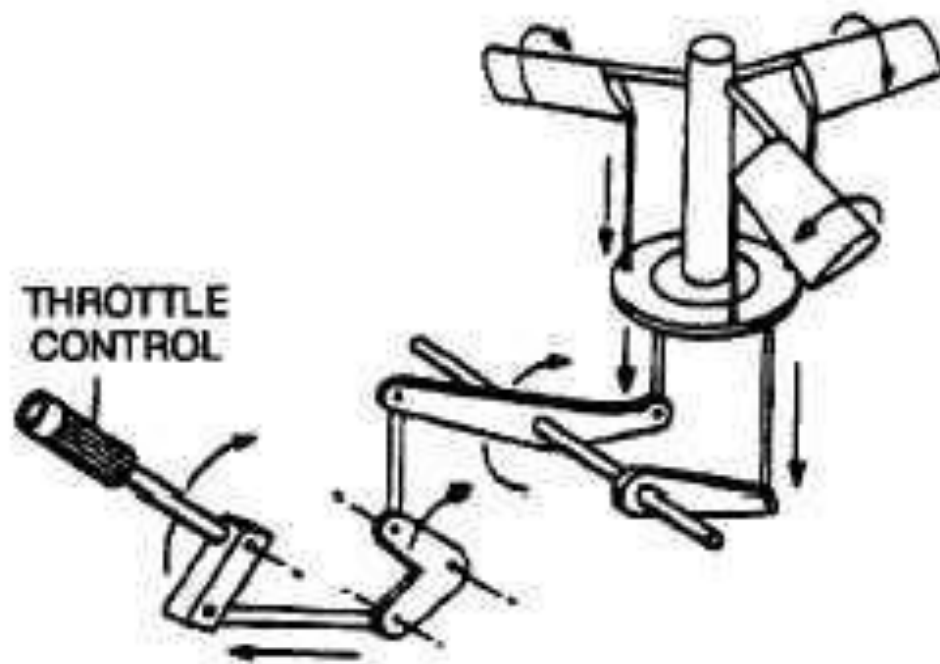
(1) 桨叶尺寸越大，越难迅速改变其角速度

$$\begin{aligned} M = \frac{1}{2\pi} C_M \rho \varpi^2 (2r_p) & \Rightarrow \begin{aligned} M &\sim \varpi^2 R^5 \\ J &\sim R^5 \end{aligned} \Rightarrow \alpha = \frac{M}{J} \sim \frac{\varpi^2 R^5}{R^5} = \varpi^2 \\ \text{桨尖速度常数假设 } \varpi &\sim 1/r_p \Rightarrow \varpi \sim 1/R \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} M &\sim \varpi^2 R^5 \\ J &\sim R^5 \end{aligned}} \right\} \alpha \sim \frac{1}{R^2}$$

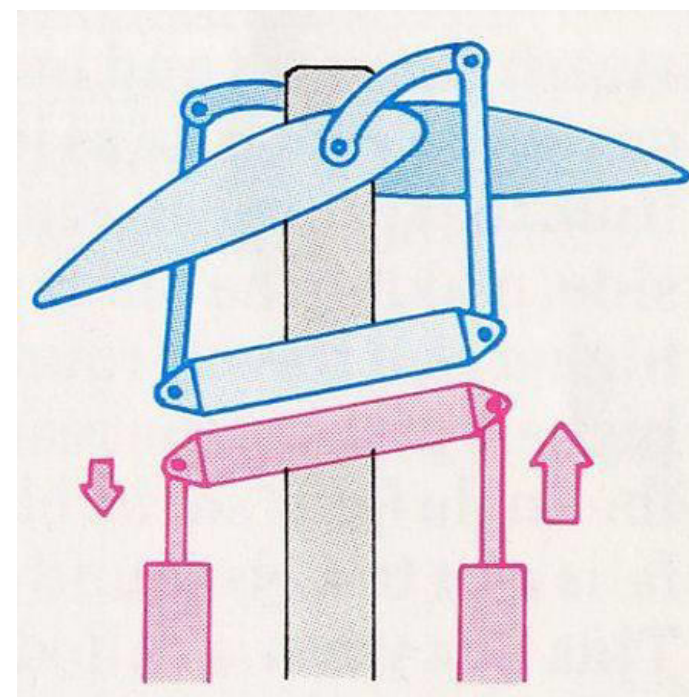
2. 多旋翼操控原理和性能评估

瓶颈

(1) 桨叶尺寸越大，越难迅速改变其角速度



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



来源<http://www.aerospaceweb.org/>

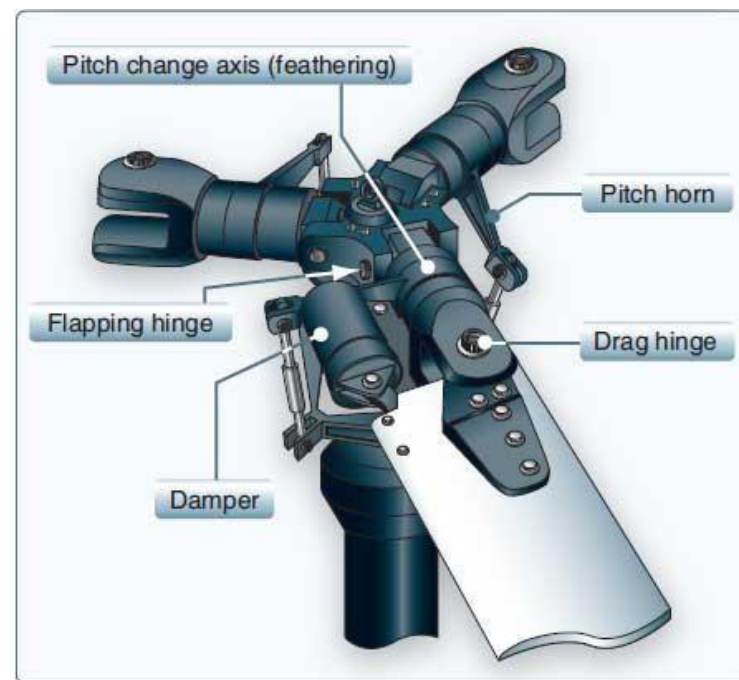
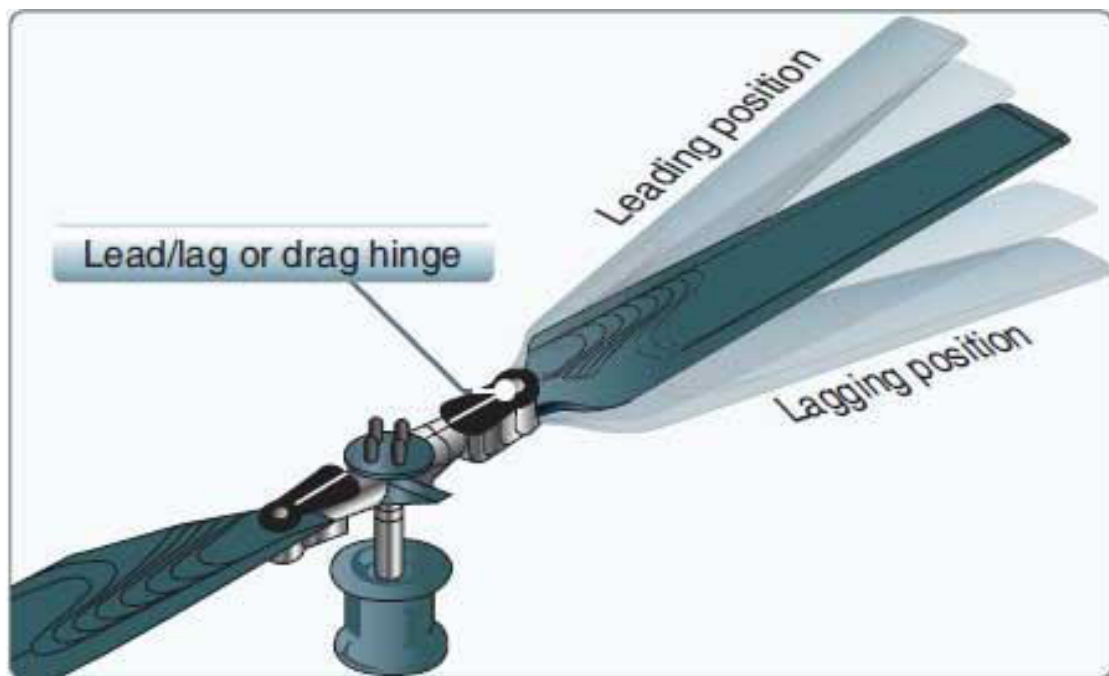
直升机通过变桨距控制

2. 多旋翼操控原理和性能评估

瓶颈



(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/>

直升机桨叶与桨毂通过铰链结构连接

2. 多旋翼操控原理和性能评估

瓶颈



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

Volocopter VC200

2. 多旋翼操控原理和性能评估

瓶颈



Volocopter VC200

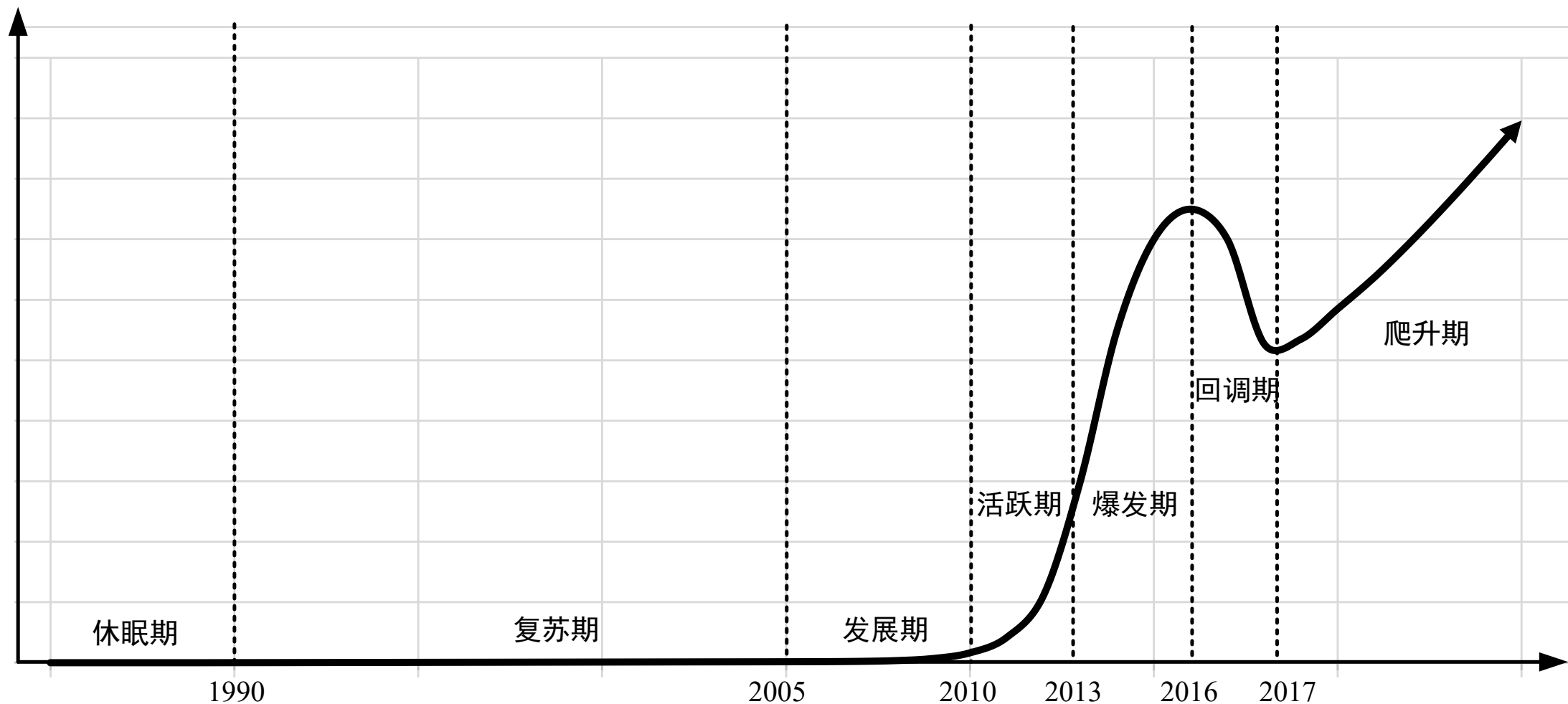
更安全？(电机多冗余大)

or

更不安全？(电机多故障率增加)

虽然单个电机失效概率增加，但通过控制分配安全性增加

3. 多旋翼发展历史

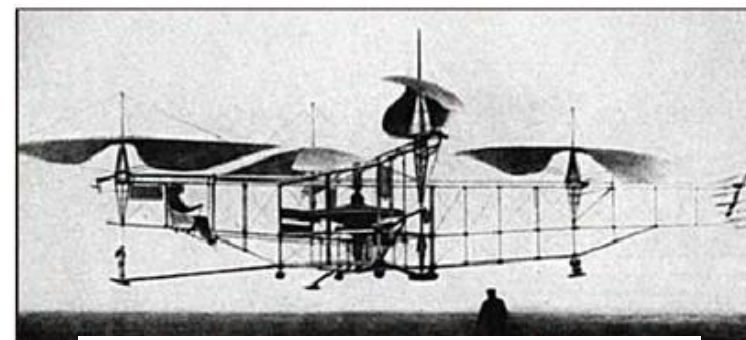


3. 多旋翼发展历史

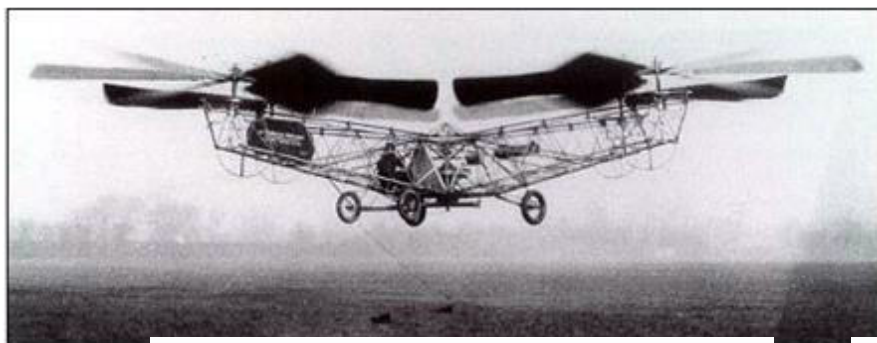
第一阶段（1990年以前）：休眠期



(a) Breguet-Richet Gyroplane No.1



(b) Oemichen No.2



(c) De Bothezat helicopter



(d) Convertawings Model "A"



(e) Curtiss-Wright VZ-7

3. 多旋翼发展历史

第一阶段（1990年以前）：休眠期



- 早在1907年的法国，在C.Richet 教授的指导下，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。

3. 多旋翼发展历史

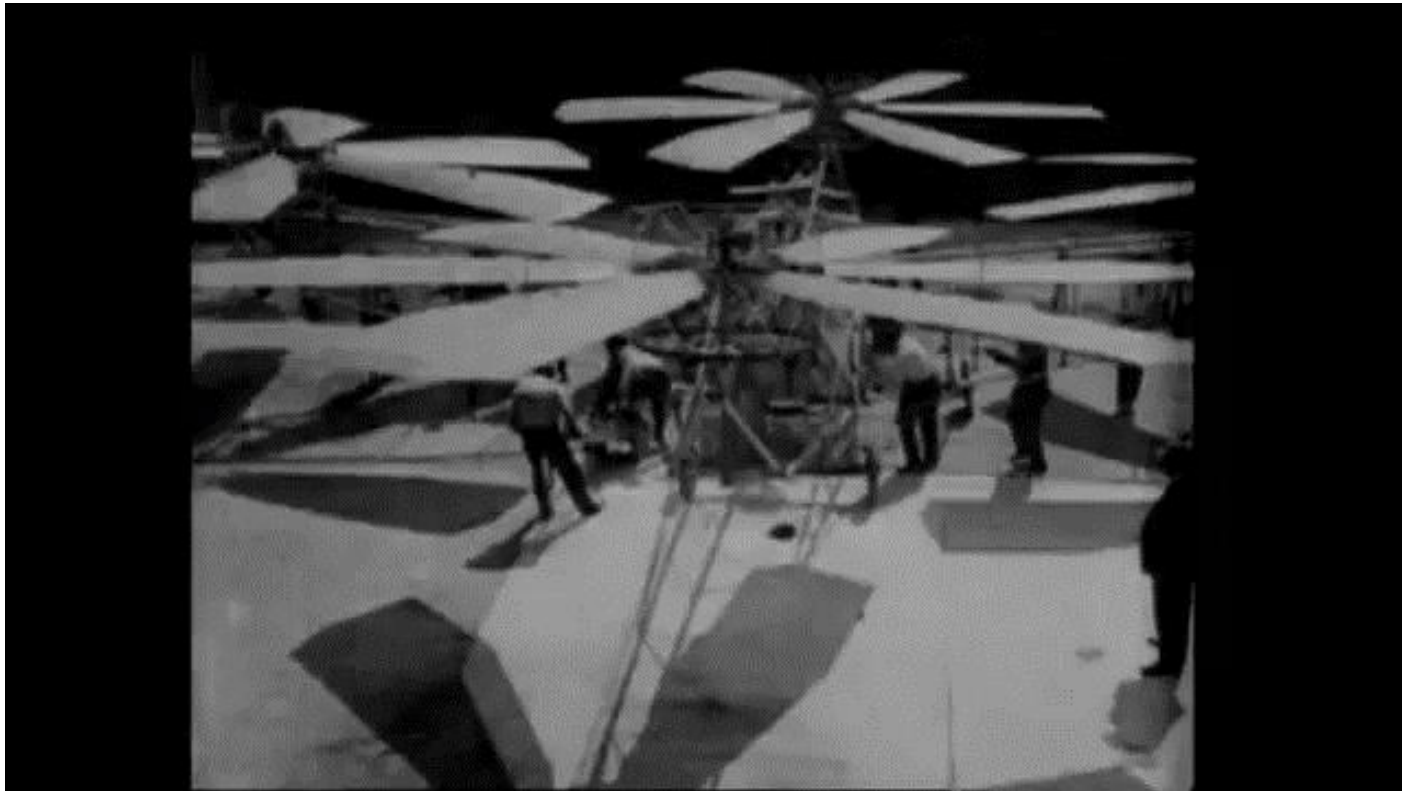
第一阶段（1990年以前）：休眠期



- E.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。

3. 多旋翼发展历史

第一阶段（1990年以前）：休眠期



- 1921年 G. 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。

3. 多旋翼发展历史

第一阶段（1990年以前）：休眠期



- 1956年，M.K.Adman 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。



- 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的测试在1959年至1960年期间得到实现，虽然它相对稳定，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。

3. 多旋翼发展历史

第二阶段（1990-2005）：复苏期



(1) 产品方面

- 90年代初，Keyence Gyro Saucer II E-570登陆日本
- 美国工程师M.Dammar于90年代开发了电动四旋翼Roswell Flyer，随后将其卖给加拿大公司 Draganflyer
- 在2002年,Silverlit X-UFO 在德国Jugend forscht（年轻研究者）比赛被设计发明



(a) Gyro Saucer 1



(b) Roswell Flyer



(c) Silverlit X-UFO

3. 多旋翼发展历史

第二阶段（1990-2005）：复苏期



(1) 产品方面



Keyence Gyro Saucer



Silverlit X-UFO

3. 多旋翼发展历史

第二阶段（1990-2005）：复苏期



(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**[7-11]
- 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

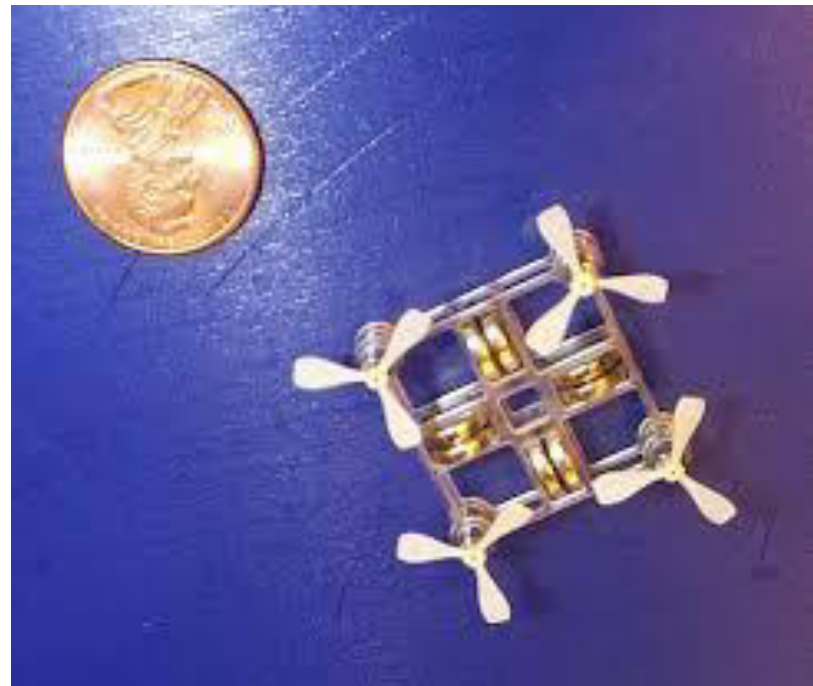
[7] Hamel T, Mahony R, Chriette A. IEEE ICRA, 2002

[8] Altug E. Ph.D. dissertation, University of Pennsylvania, 2003

[9] Kroo I, Printz F. Mesicopter Project[Online], available: <http://aero.stanford.edu/mesicopter>,

[10] Borenstein J. The Hoverbot – An Electrically Powered Flying Robot[Online], available: <http://www-personal.umich.edu/~johannb/hoverbot.htm>

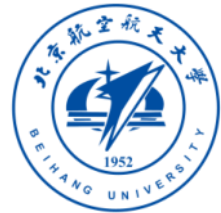
[11] Bouabdallah S, Murrieri P, Siegwart R. IEEE ICRA, 2004.



Mesicopter

3. 多旋翼发展历史

第三阶段（2005-2010）：发展期



(1) 产品方面

- 德国Microdrones GmbH于2005年成立，2006年推出的Md4-200四旋翼，2010年推出的Md4-1000四旋翼无人机系统
- 2006年，德国人H. Buss和I. Busker主导了一个四轴开源项目Mikrokopter
- 美国Draganflyer 公司在2004年推出Draganflyer IV四旋翼，并随后在2008年推出了工业级的多旋翼Draganflyer X6
- 2007年，德国Ascending Technologies创立，2016年被Intel收购



(a) Md4-200



(b) Draganflyer X6

3. 多旋翼发展历史

第三阶段（2005-2010）：发展期

(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[12, 13]。

- 得到《自然》杂志关注[14]。

[12] How J P, et al. Real-time indoor autonomous vehicle test environment. IEEE Transaction on Control Systems, 2008, 28(2): 51-64.

[13] Michael N, et al. The grasp multiple micro-uav test bed. IEEE Transaction on Robotics & Automation Magazine, 2010, 17(3): 56-65.

[14] Stafford N. Spy in the sky. Nature, 2007, 445(22): 808-809



Real-Time Indoor Autonomous Vehicle Test Environment, MIT



The Grasp Multiple Micro-UAV Test Bed, UPENN

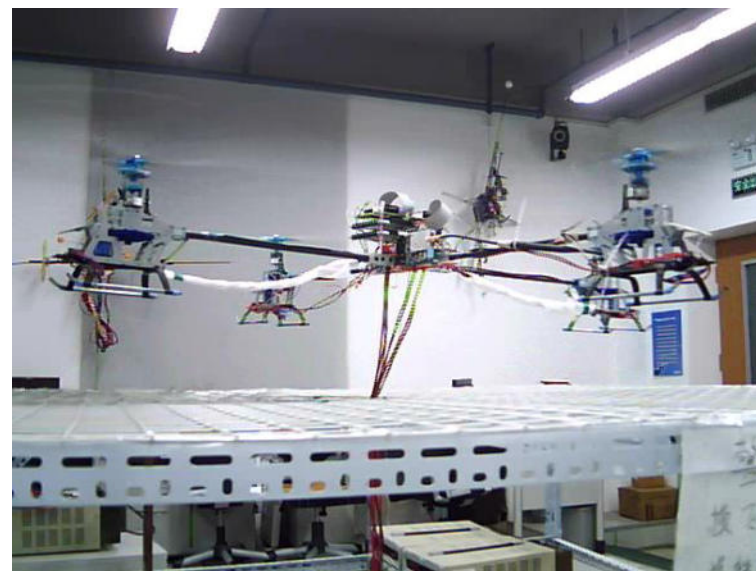
3. 多旋翼发展历史

第三阶段（2005-2010）：发展期

(2) 学术方面



我们实验室于2008年左右的多旋翼工作

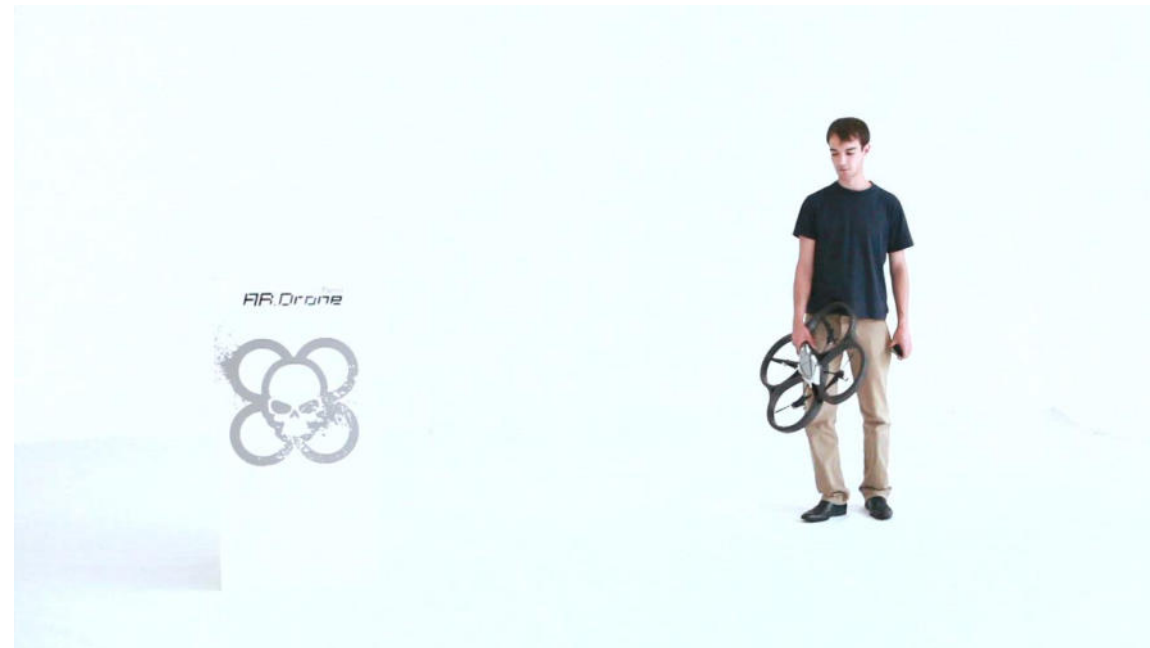


3. 多旋翼发展历史

第四阶段（2010-2013）：活跃期

(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**



3. 多旋翼发展历史

第四阶段 (2010-2013) : 活跃期

(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。
- 多旋翼开源自驾仪增多。



3. 多旋翼发展历史

第四阶段（2010-2013）：活跃期



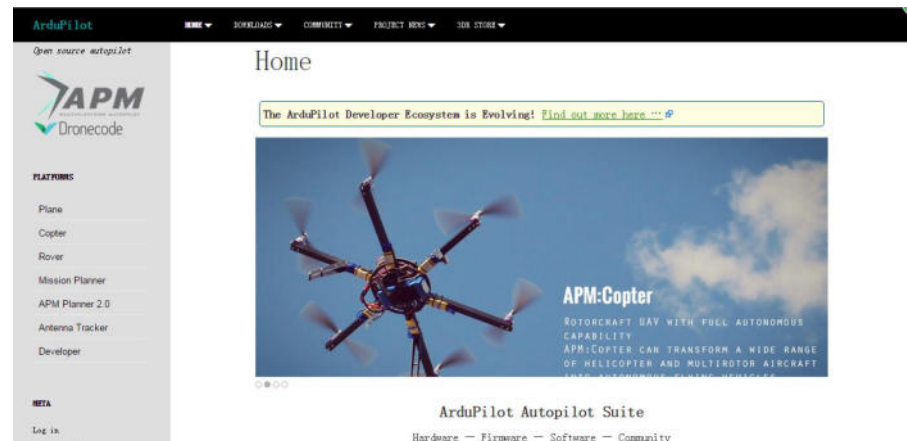
开源项目（Open-Source Projects）	网址（Web site URL）	开源项目	网址（Web site URL）
Arducopter	http://ardupilot.com	Taulabs	http://forum.taulabs.org/
Openpilot	http://www.openpilot.org/	Flexbot	http://www.flexbot.cc/
Paparazzi	http://paparazziuav.org	Dronecode(开源无人机航空操作系统)	https://www.dronecode.org/
Pixhawk	https://pixhawk.ethz.ch/	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		
Erlerobot	http://erlerobotics.com/		
MegaPirateNG	http://code.google.com/p/megapirateng		

3. 多旋翼发展历史

第五阶段（2013-2016）：爆发期

(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. 多旋翼发展历史

第五阶段（2013-2016）：爆发期

(1) 产品方面（2013年8月-2015年9月）



Lily四旋翼视频



CvPhv LVL1介绍视频

飞机型号	公司	飞机型号	公司	发布时间	国家	特点
Spiri	Patrick Edw Daugherty	Splash Drone	Urban Drones	2015.3	美国	防水设计，可以停留在水面上
Stingray500	Curtis Young Blo	SOLO	3D Robotics	2015.4	美国	集最先进的技术于一身，提高航拍体验
AR.Drone 2.0	Parrot	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
AirDog	Helico Aeros Industries	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
Rolling Spider	Parrot	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
IRIS+	3D Robotics	CyPhy LVL1	CyPhy Works	2015.4	美国	水平飞行拍摄时机身不会倾斜
Nixie	Fly nexie	Lily	Lily	2015.5	美国	可手抛起飞、自动跟随、防水
GHOST 1.0	EHANG	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
Mind4	AirMind	Yeair!	airstier	2015.6	德国	油电混合动力
inspire 1	DJI	Tayzu	Tayzu Robotics	2015.7	美国	全程自动化处理的无人机系统
Bebop	Parrot	Fotokite Phi	Perspective Robotics AG	2015.8	瑞士	可折叠，无需等待GPS锁定或校准
Vertex VTOL	ComQuestVentur	独角兽X	FPVStyle	2015.8	中国	前飞速度快
Skydio	Skydio	Micro Drone3.0	Extreme Fliers	2015.8	英国	3D虚拟情景的技术
Steadidrone Flare	Steadidrone	Feibot	Feibot	2015.9	中国	基于智能手机平台
Airborg H61500	Top Technologies	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。



Nixie折叠和抛飞视频



视频运动相机厂商
GoPro的Karma无人机

3. 多旋翼发展历史

第五阶段（2013-2016）：爆发期

(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。



拉斐尔·安德列在TED上的演讲

REVIEW

doi:10.1038/nature14542

Science, technology and the future of small autonomous drones

Dario Floreano¹ & Robert J. Wood²

We are witnessing the advent of a new era of robots — drones — that can autonomously fly in natural and man-made environments. These robots, often associated with defence applications, could have a major impact on civilian tasks, including transportation, communication, agriculture, disaster mitigation and environment preservation. Autonomous flight in confined spaces presents great scientific and technical challenges owing to the energetic cost of staying airborne and to the perceptual intelligence required to negotiate complex environments. We identify scientific and technological advances that are expected to translate, within appropriate regulatory frameworks, into pervasive use of autonomous drones for civilian applications.

3. 多旋翼发展历史

第六阶段（2016-2017）：回调期

(1) 学术方面

自主化和群体化的深入，伴随着深度学习的大潮和GPU硬件的兴起自主化逐渐显现**智能化**，但由于硬件还比较不够成熟，放在多旋翼飞行器上略显笨重，依然如此，也能完成一些让人惊喜的任务。

- 美国国防高级研究计划局（DARPA）的“**快速轻量自主**”（Fast Lightweight Autonomy, FLA）项目；
- 2017年1月DARPA开始征集另外一个集群战术研究项目：DARPA的**进攻性群体战术（OFFSET）**。



DARPA Fast Lightweight Autonomy (FLA) researchers discuss their unique approaches to achieving autonomous flight without GPS or remote control (RC) communication links

DARPA的FLA项目

DARPA's OFFensive Swarm-Enabled Tactics (OFFSET) program conducted its third field experiment in December 2019 at the Combined Arms Collective Training Facility (CACTF) at the Camp Shelby Joint Forces Training Center in Mississippi.



DARPA的OFFSET项目

3. 多旋翼发展历史

第六阶段（2016-2017）：回调期

(2) 产业方面

这段时期的回调是因为**无人机以及应用增多**，无人机市场**接近饱和**，竞争基本上都集中在了多旋翼无人机上，同质化严重。不少公司进行了较大规模的裁员，一些产品难以出货量产，使得行业整体陷入困难，比如：自拍无人机的先驱Lily和运动相机厂商GoPro的Karma无人机。

另外一方面，无序的使用使得**扰航事件频发**，使得国内外收紧对无人机飞行的管控。



Lily



运动相机厂商GoPro的Karma无人机

3. 多旋翼发展历史



第七阶段（2018年至今）：爬升期

- 研究方面是**智能化、群体化、小型化和大型化**。
- 学术界的进步离不开英伟达发布的**计算**单元。
- 这段时间的大型**载人多旋翼**无人机的初创公司也如雨后春笋冒了出来，飞行器巨头空客、波音、霍尼韦尔和贝尔等传统航空巨头，丰田和吉利等传统汽车厂商，以及Uber等新兴世界级影响力的企业纷纷加入这个万亿级市场。
- 除了民用领域，在军用领域，利用多旋翼平台替代传统导弹平台，形成**智能化武器**成为各国发展的重点。

3. 多旋翼发展历史

第七阶段（2018年至今）：爬升期

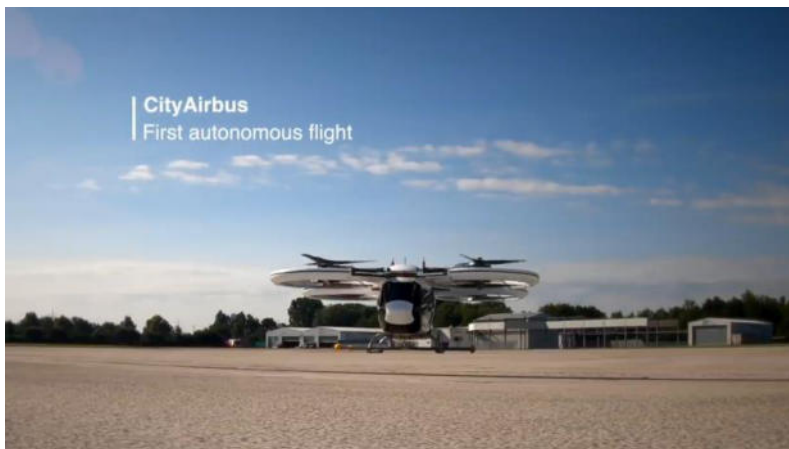
表 1.5: 部分 eVOTL 产品

名称	公司	发布时间	国家	特点
Lilium Jet	Lilium GmbH	2015	德国	最多可搭载五名乘客，最大飞行距离 300 公里
VC200	Volocopter GmbH	2016.03	德国	两人座椅，18 旋翼，设计最高时速 100km/h
AirQuadOne	Neva Aerospace Ltd	2017.06	英国	载重一人或 100kg 负载，驱动 10 对反向旋转的涵道风扇，提供分布式推力
Vahana	A ³ by Airbus	2018.01	美国	一名飞行员、一名乘客或 200kg 载重，最高时速 230
Ehang 216	Ehang	2018.02	中国	无人驾驶，最多允许两名乘客，已在美国通过测试取得 FAA 飞行许可
aEro 2	Dufour Aerospace	2018.03	瑞士	最多两名乘客，混合动力或纯电动
Cargo Air Vehicle (CAV)	Boeing	2018.09	美国	8 旋翼，最大载重 225kg
CityAirBus	Airbus Helicopters	2019.03	法国	可搭载四名乘客，巡航速度为 120 km/h
Skai	Alaka'i Technologies	2019.05	美国	氢燃料电池供电，六旋翼飞行器
Cartivator	SkyDrive	2018.07	日本	可承载两人，设计最高时速为 100km/h，50m 高速预计平均速度为 60km/h
Pop.Up Next	Italdesign	2018.11	意大利	空中客车公司，奥迪，Italdesign 三家合作无人驾驶可飞行汽车，预计完整原型机将在 2020 年飞行
eCRM-004	Uber Elevate	2019.09	美国	一名驾驶员及两名乘客，纯电力驱动，可低空飞行
AutoFlight V88	AutoFlightX GmbH	2019.09	德国	无人驾驶，最大起飞重量达 1 吨，
VA-1X	Vertical Aerospace Ltd.	2019.09	英国	一名飞行员和四名乘客，翼展 15m，长 13m，总载重 450kg
Cora	Wisk	2019.12	美国	12 个垂直升力支柱及推进支柱，锂电池供电
TF-2A	Terrafugia	2019.12	美国	一名飞行员，纯电力驱动
Nexus-4EX	Bell	2020.06	美国	最多允许五名乘客，分布式动力控制，低噪音



3. 多旋翼发展历史

第七阶段（2018年至今）：爬升期



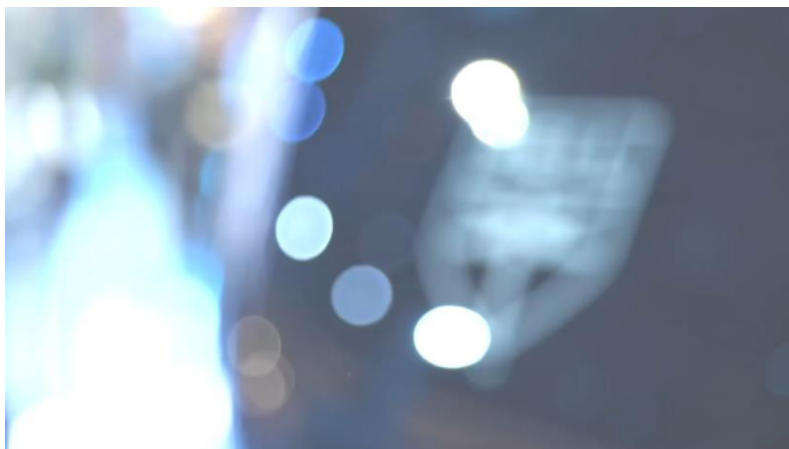
空客eVTOL项目



波音eVTOL项目



霍尼韦尔将与Vertical Aerospace合作eVTOL项目



贝尔eVTOL项目



Uber公司eVTOL项目



新兴亿航eVTOL项目

3. 多旋翼发展历史

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**

AR.Drone、大疆小精灵Phantom

(3) 高估了新技术两三年内的的发展，而低估了新技术未来十年的发展

(4) 载人和军事应用将是拉动多旋翼（无人机）发展的持续动力

4. 本书的目的和写作结构

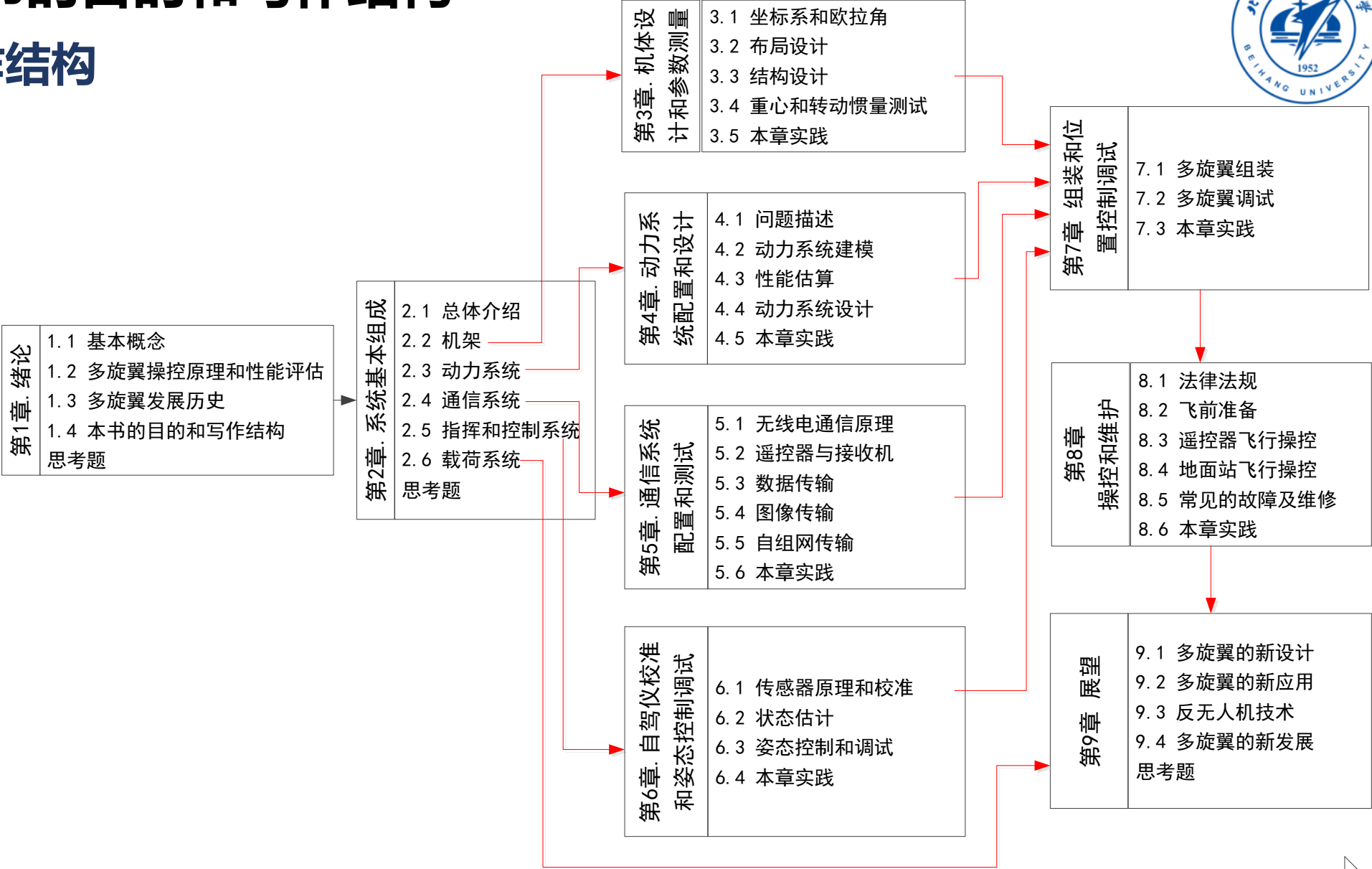


■ 本书的目的

- 本书瞄准多旋翼无人机的**应用实践**，让更多读者尽可能在不具备开发知识储备前，也能够组装、调试、飞行以及维护。
- 本书的受众是具备**高中及以上知识**的读者。
- **理论和应用实践完全打通**。这些让读者不仅掌握多旋翼无人机的原理，知其然也知其所以然，而且能够理论联系实践，进行深化理解。

4. 本书的目的和写作结构

写作结构



概念层面认知（总） 系统层面感性认识（总） 子系统层面深入认识（分） 应用层面系统深入认识（总）



可靠飞行控制研究组
RELIABLE FLIGHT CONTROL GROUP

□ 感谢崔根为本讲课程准备做出的贡献



R f l y 官网



研究组公众号



视 频 号



B 站 官方 账号



优酷 账号

相 关 书 籍

RELATED BOOKS



多旋翼飞行器

从原理到实践

ISBN9787121454158

组装试飞



多旋翼无人机

远程控制实践

ISBN9787121447129

开发实践



多旋翼飞行器

设计与控制实践

ISBN9787121377648

开发实践



多旋翼飞行器

设计与控制

ISBN9787121312687

理论研究



可靠飞行控制研究组
RELIABLE FLIGHT CONTROL GROUP

