



多旋翼飞行器设计与控制

第三讲 机架设计

全权 副教授

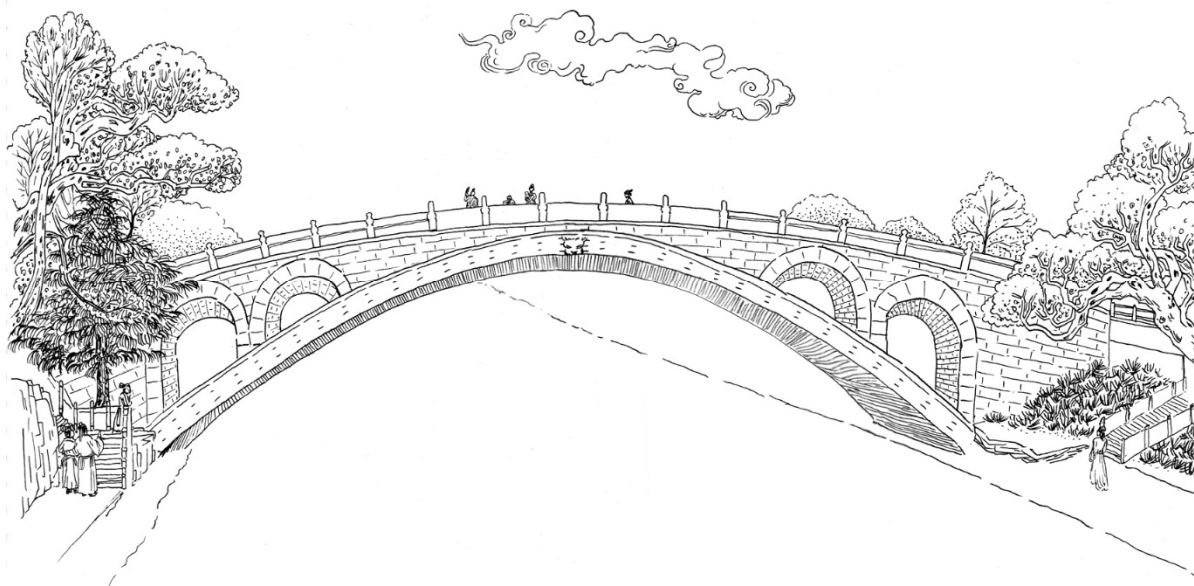
qq_buaa@buaa.edu.cn

自动化科学与电气工程学院

北京航空航天大学



东方智慧



赵州桥



核心问题

在多旋翼设计中需要注意些什么？



大纲

1. 布局设计

2. 结构设计

3. 本讲小结



1. 布局设计

□ 机身基本布局

(1) 交叉型

按飞行方向与机身关系，
又分为+字型和X字型。

目前常用的X字型结构，因为：

- 机动性更强
- 前视相机的视场角不容易被遮挡。

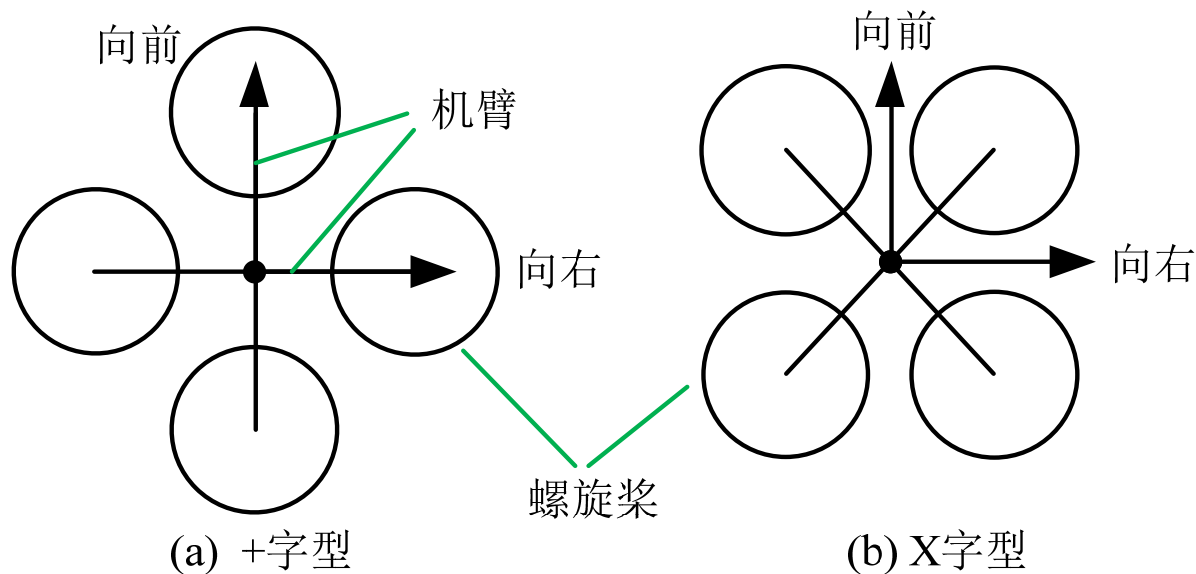


图3.1: 传统四旋翼的结构形式

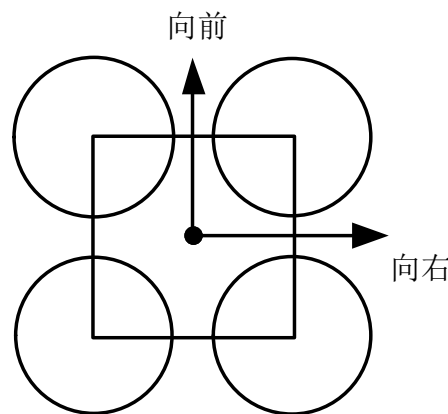


1. 布局设计

□ 机身基本布局

(2) 环型

- 与传统交叉型机架相比，其刚性更大
- 可较大程度避免飞行中机架所产生的振动，增加了机架结构强度。
- 增加了机架的重量，转动惯量，灵活性降低。



(a) 示意图



(b) 实物图

图3.2: 环形四旋翼的结构形式



1. 布局设计

□ 旋翼安装

(1) 常规布局 and 共轴双桨

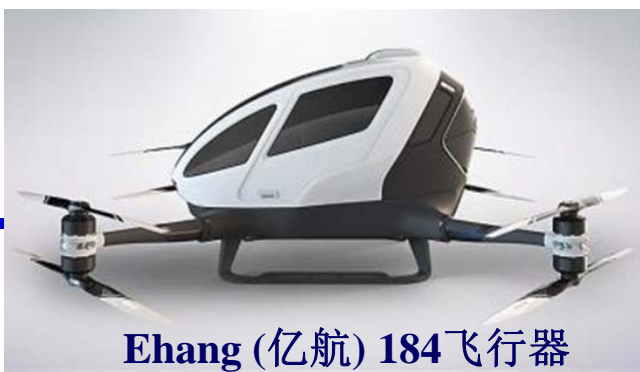
1) 共轴双桨优点

- 不增加多旋翼整体尺寸
- 减少螺旋桨对相机视场的遮挡

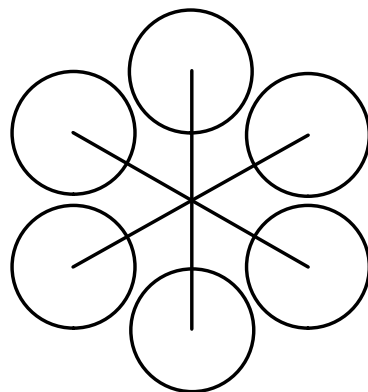
2) 注意

- 会降低单个螺旋桨的效率。大概共轴双桨只相当于1.6个螺旋桨
- 根据实验[1]推荐 $h/r_p > 0.357$

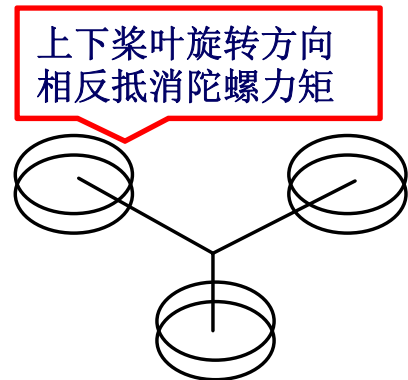
[1] Bohorquez F. Rotor hover performance and system design of an efficient coaxial rotary wing micro air vehicle [Ph. D. dissertation], University of Maryland College Park, USA, 2007.



Ehang (亿航) 184 飞行器



(a) 常规形式



(b) 共轴双桨形式

图3.3: 常规布局 and 共轴双桨布局示意图

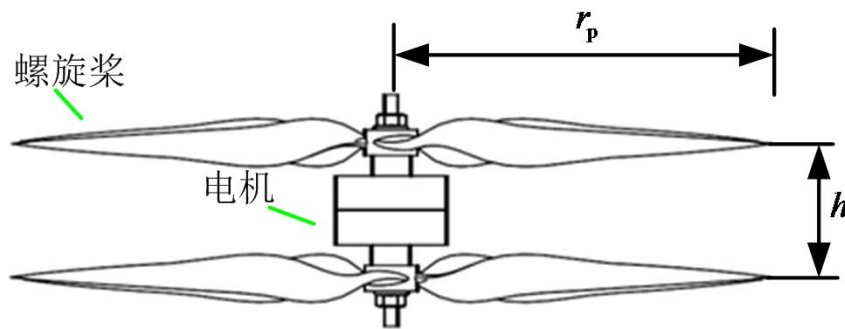


图3.4: 共轴双桨的简单连接示意图



1. 布局设计

□ 旋翼安装

(2) 桨盘角度

1) 螺旋桨桨盘水平装配

- 简单
- 需云台使相机保持水平

2) 螺旋桨桨盘倾斜装配

- 至少六个桨 (为什么?)
- 无需云台

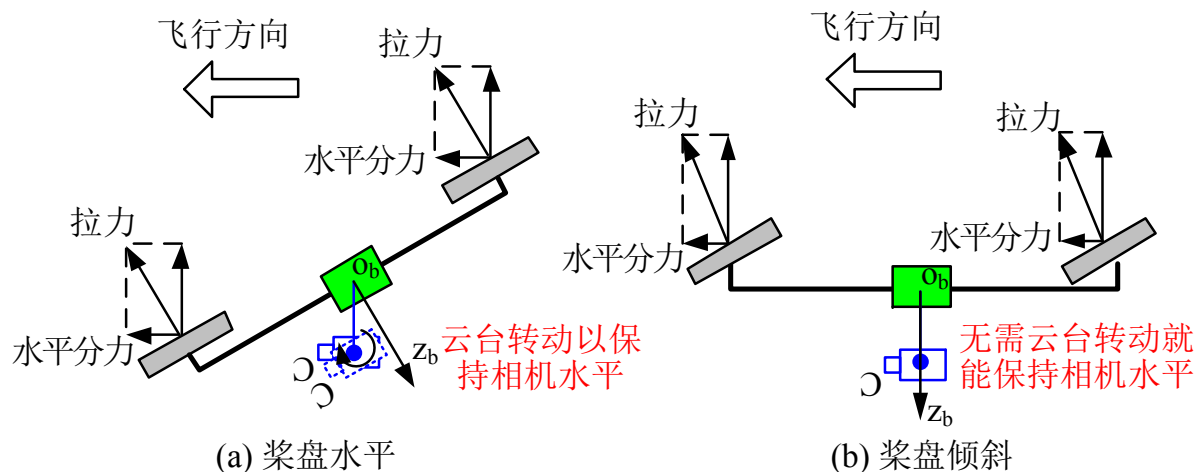


图3.5:桨盘水平和桨盘倾斜多旋翼的前飞方式



图3.6:桨盘倾斜多旋翼CyPhyLVL1

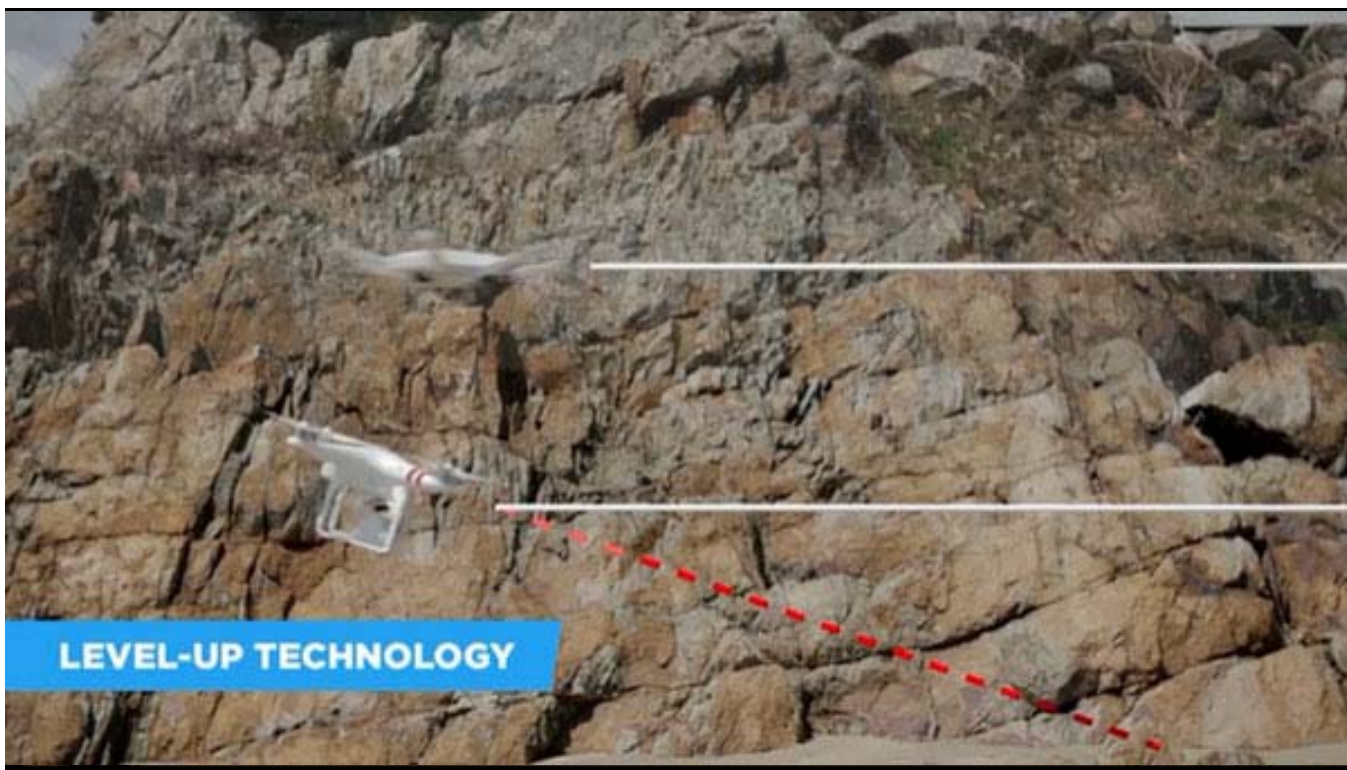


1. 布局设计

□ 旋翼安装

(2) 桨盘角度

视频: CyPhyLVL1飞行视频





1. 布局设计

□ 旋翼安装

(3) 旋翼朝向



大疆
Phantom



极飞XMission



深圳零度Xplorer

桨盘位于机臂位置上方:

- 1) 螺旋桨产生拉力
- 2) 着陆阶段不易碰到障碍，而损伤桨
- 3) 遮挡相机视野小



亿航Ghost

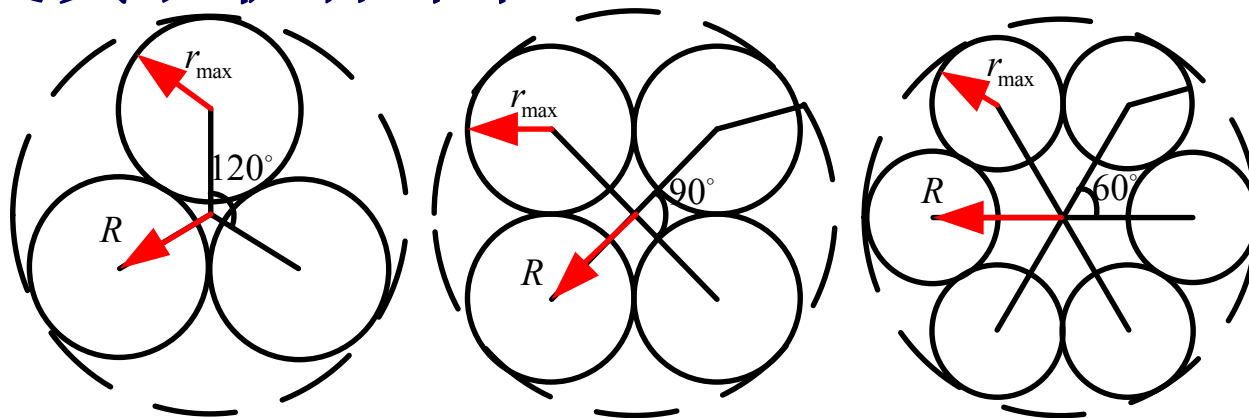
桨盘位于机臂位置下方

- 1) 螺旋桨产生推力
- 2) 下洗气流完整，防雨，气流低于飞控气压计高度准确，不脱桨



1. 布局设计

□ 旋翼和机体半径



(a) Y6六旋翼（共轴双桨）

(b) 传统四旋翼

(c) 传统六旋翼

图3.7: 多旋翼机体半径与最大旋翼半径示意图

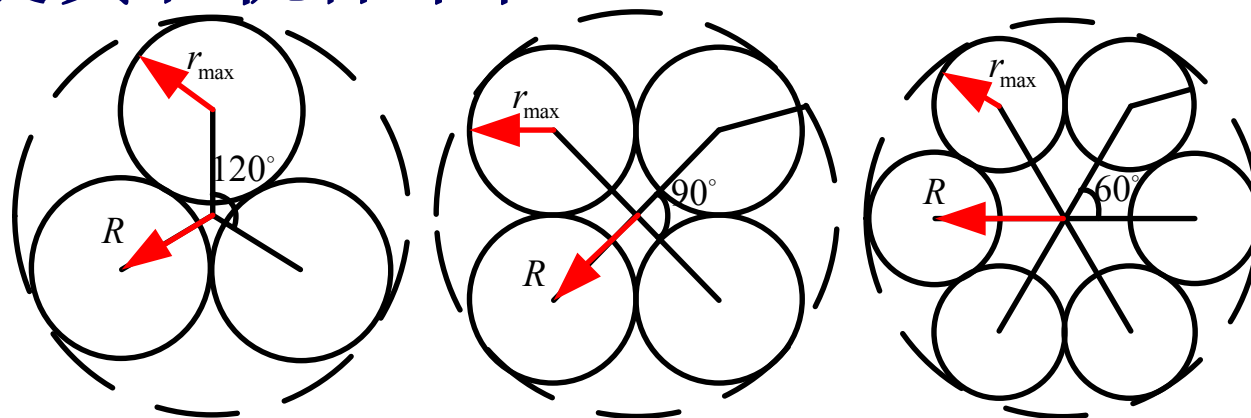
n_r 机臂旋翼飞行器，机架半径 R 与旋翼最大半径 r_{\max} 存在如下关系 (θ 表示轴间夹角)

$$R = \frac{r_{\max}}{\sin \frac{\theta}{2}} = \frac{r_{\max}}{\sin \frac{180^\circ}{n_r}}$$



1. 布局设计

□ 旋翼和机体半径



(a) Y6六旋翼（共轴双桨）

(b) 传统四旋翼

(c) 传统六旋翼

图3.7: 多旋翼机体半径与最大旋翼半径示意图

实验[2]表明，当桨与桨之间的距离从一个桨半径到0.1个桨半径变化时，气流对飞行器的整体性能影响很小。因此，为了使飞行器尽可能的紧凑，可以取螺旋桨半径 r_p 满足

$$r_{max} = 1.05r_p \sim 1.2r_p$$

[2] Harrington A M. Optimal Propulsion System Design for A Micro Quad Rotor [Master dissertation]. University of Maryland College Park, USA, 2011.



1. 布局设计

□ 尺寸和机动性关系

T_p, M_p 为单个螺旋桨的拉力与力矩, T, M 为多旋翼总拉力与力矩, ω 为桨叶转速, R 为多旋翼机架半径, J 为多旋翼转动惯量, r_p 为螺旋桨半径。

减小多旋翼机体尺寸对多旋翼惯性、有效负载具有很大影响, 并最终影响最大可达角加速度 α 和位移加速度 a 。

$$T_p = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 C_T \rho \omega^2 (2r_p)^4$$

$$M_p = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 C_M \rho \omega^2 (2r_p)^5$$

$$\begin{cases} T \sim T_p \\ M_{pitch,roll} \sim T_p \cdot R \\ M_{yaw} \sim M_p \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} T \sim \omega^2 R^4 \\ M \sim \omega^2 R^5 \end{cases}$$

$$m \sim R^3, J \sim R^5$$

$$a = \frac{T}{m} \sim \frac{\omega^2 R^4}{R^3} = \omega^2 R$$

$$\alpha = \frac{M}{J} \sim \frac{\omega^2 R^5}{R^5} = \omega^2$$

(1) 马赫数尺度限制(这里符号“ \sim ”表示“在同一数量级”)

$$\omega \sim 1/r_p \Rightarrow a \sim \frac{1}{R}, \alpha \sim \frac{1}{R^2}$$

(2) 弗劳德数尺度限制

$$v_b^2 / Rg \sim \omega^2 r_p^2 / Rg \sim 1 \Rightarrow \omega \sim 1/\sqrt{r_p} \Rightarrow a \sim 1, \alpha \sim \frac{1}{R}$$

尺寸越大
机动性越差



1. 布局设计

□ 重心位置

在设计时，需要将重心设计到多旋翼的中心轴上。另外的一个问题是将重心设计到多旋翼螺旋桨形成的桨盘平面的上方还是下方呢？



(a) 重心在下侧



(b) 重心在上侧

图3.8: Freely多旋翼的两种相机安装方式

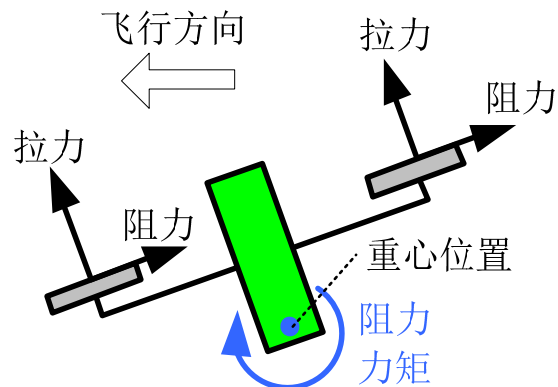


1. 布局设计

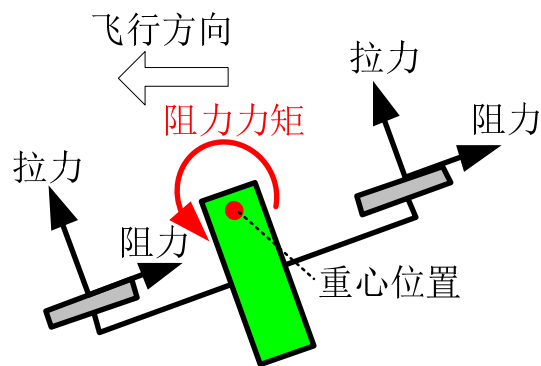
□ 重心位置

(1) 多旋翼前飞情形

- 在右图中，诱导的来流会产生平行于桨盘平面的阻力
- 如图(a)，如果多旋翼重心在桨盘平面下方，那么阻力形成的力矩会促使多旋翼俯仰角转向0度方向
- 如图(b)，若多旋翼重心在桨盘平面上，那么阻力形成的力矩会促使多旋翼俯仰角朝发散方向发展，直至翻转。因此，当多旋翼前飞时，重心在桨盘平面的下方会使前飞运动稳定。



(a) 前飞时重心偏低



(b) 前飞时重心偏高

图3.9: 多旋翼受力简化图



1. 布局设计

□ 重心位置

(2) 多旋翼风干扰情形

- 当阵风吹来，诱导的来流会产生平行于桨盘平面的阻力
- 如图(c)，如果多旋翼重心在下，那么阻力形成的力矩会促使多旋翼俯仰角朝发散的方向发展，直至翻转。
- 如图(d)，若多旋翼重心在上，那么阻力形成的力矩会促使多旋翼俯仰趋向于0。因此，当多旋翼受到外界风干扰时，重心在桨盘平面的上方可以抑制扰动。

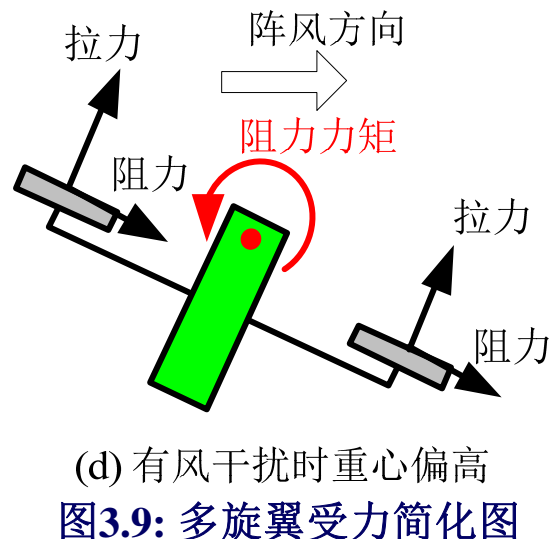
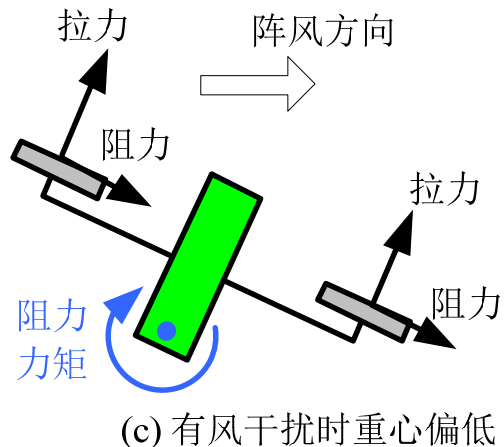


图3.9: 多旋翼受力简化图



1. 布局设计

□ 重心位置

(3) 结论

- 无论重心在桨盘平面的上方或下方都不能使多旋翼稳定。
- 需要通过反馈控制将多旋翼平衡。然而，如果重心在桨盘平面很靠上的位置，会使多旋翼某个运动模态很不稳定。因此，实际中建议将重心靠近多旋翼的中心，或者根据需求可以稍微靠下。这样控制器控制起来更容易些。关于更具体的内容可参考文献[3]。

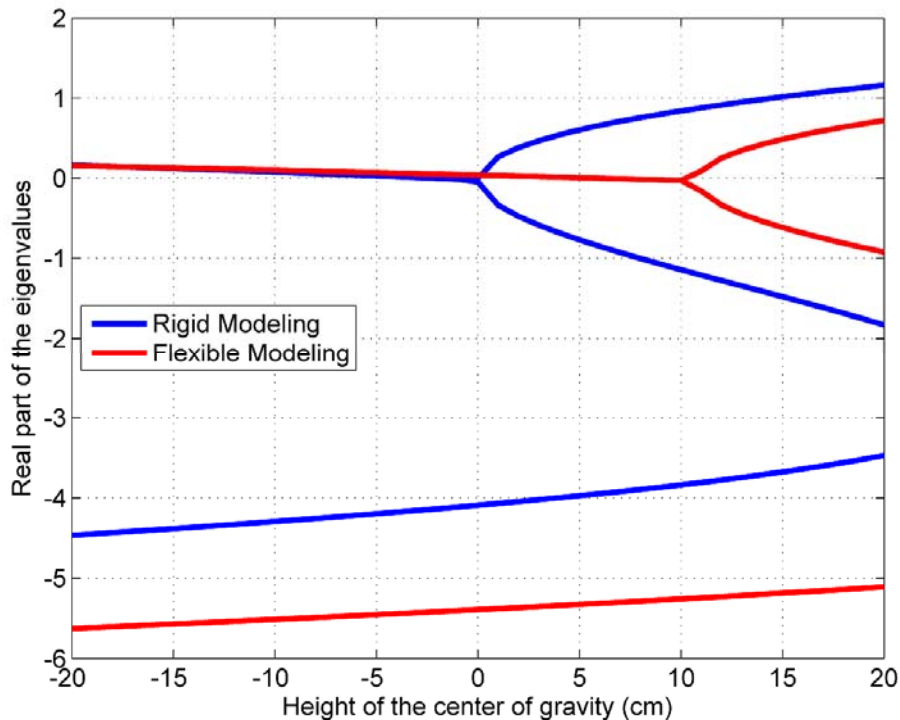


图3.10: 重心高度与稳定性的关系[3, Fig.7]

[3] Bristeau P J, Martin P, Salaun E, et al. The role of propeller aerodynamics in the model of a quadrotor UAV. In: Control Conference (ECC). European: IEEE, 2009. 683-688



1. 布局设计

□ 自驾仪安装位置

理想位置应在多旋翼的中心。若自驾仪离飞行器中心较远，由于存在离心加速度和切向加速度，将会引起加速度计的测量误差，即“**杆臂效应**”。

(1) 标准安装方位



图3.11: 飞控板安装位置

(2) 代用安装方位

Pixhawk/APM2 自驾仪可在超过30度角的方位安装在机架上，需要通过相应的软件设置重新得到自驾仪安装在机体上的标准方位。



1. 布局设计

□ 气动布局

对外形进行设计主要是为了降低飞行时的阻力。按其产生的原因不同可分为

(1) 摩擦阻力

(2) 压差阻力

(3) 诱导阻力

(4) 干扰阻力。要减少该阻力，需要妥善考虑和安排各部件之间的相对位置关系，部件连接处尽量圆滑过渡，减少漩涡产生。

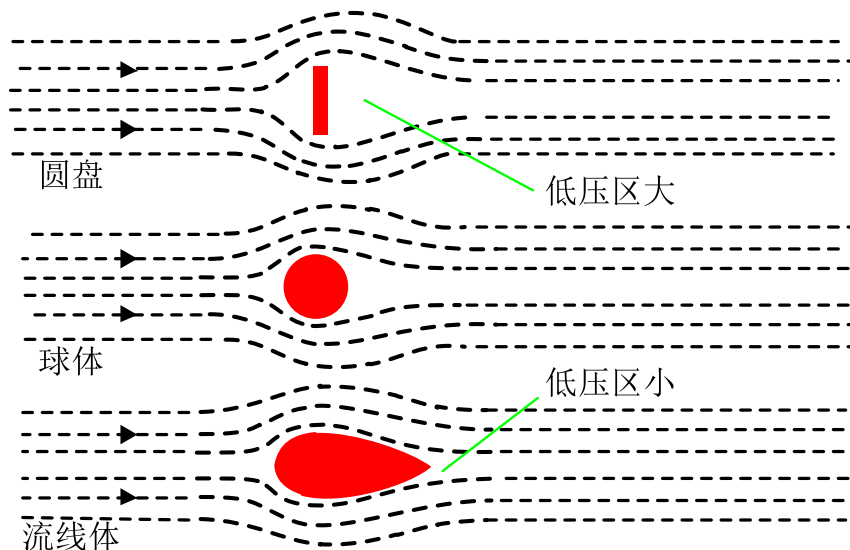


图3.12: 压差阻力示意图



1. 布局设计

□ 气动布局

设计建议:

(1) 需要考虑多旋翼前飞时的倾角, 减少最大迎风面积。

(2) 并设计流线型机身

(3) 考虑和安排各部件之间的相对位置关系, 部件连接处尽量圆滑过渡, 飞机表面也要尽量光滑

(4) 通过CFD仿真计算阻力系数, 不断优化



(a) 大疆Inspire 1



(b) 极飞Xmission



(c) Microdrones MD4-3000



(d) DHL Parcelcopter

图3.13: 具有一定外形设计的多旋翼



2.结构设计

□ 机体基本设计原则

- (1) 刚度、强度满足负载要求，机体不会发生晃动、弯曲；
- (2) 满足其他设计原则下，重量越轻越好；
- (3) 合适的长宽高比，各轴间距、结构布局适宜；
- (4) 飞行过程中，满足其他设计原则下，保证机体振动越小越好；
- (5) 美观耐用。



2.结构设计

□ 减振设计

(1) 减振意义

1) 飞控板上的加速度传感器对振动十分敏感，而加速度信号直接关系到姿态角和位置的估计，因此十分重要。具体地：

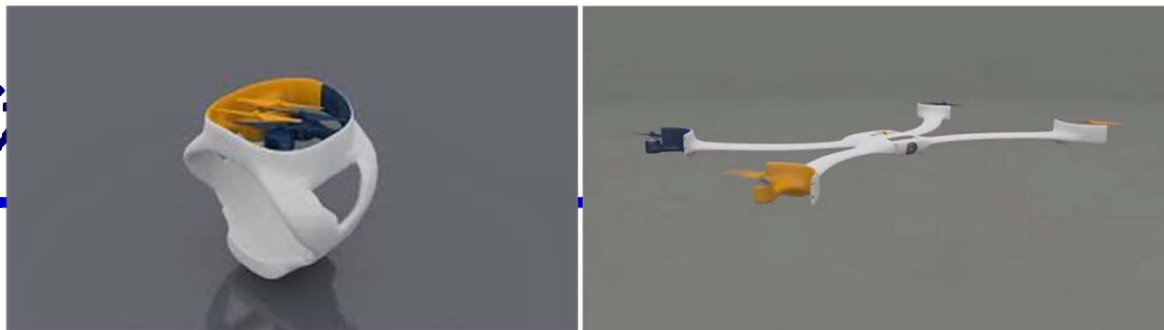
- 加速度信号直接关系到姿态角和姿态角速率的估计。
- 飞控程序融合了加速度计和气压计、GPS数据来估计飞行器的位置。而在飞行器定高、悬停、返航、导航、定点和自主飞行模式下，位置估计很关键

2) 减振另外一个重要的作用是提高成像的质量，这样就可以不依赖云台。这对于多旋翼的小型化至关重要。



2.结构设计

□ 减振设计



(a) 收起状态

(b) 展开状态

图3.15: Nixie可穿戴四旋翼概念机

(2) 振动的主要来源

机体振动主要来源于机架变形、电机和螺旋桨不对称。

1) 机架

- 机架变形特别是机臂变形会导致产生异步振动，所以机臂的刚度越大越好；
- 一般的碳纤维多旋翼机架具有足够的抗扭特性和抗弯特性；
- 相比而言，铝制机架刚性更好，但更重；
- 要保证电机与机臂的安装连接，以及机臂与控制云台的安装连接是安全可靠的，并具有一定的减震缓冲效果。



2.结构设计

□ 减振设计

(2) 振动的主要来源

2) 电机

- 电机能够平滑稳定运行；
- 桨夹需要和电机轴承、螺旋桨中心共轴，避免电机转动时产生偏心力；
- 电机平衡。



2.结构设计

□ 减振设计

(2) 振动的主要来源

3) 螺旋桨

- 螺旋桨平衡调节器；
- 螺旋桨应匹配机架型号和机体重量，并在顺逆时针旋转时具有相同的韧性；
- 碳纤维刚度大，但旋转时存在安全隐患；
- 低速大螺旋桨相比于高速小桨效率更高，但是振动幅度较大。



2.结构设计

减振设计

(3) 振动强度约束

- 1) 一般在多旋翼横向振动强度低于0.3g，在纵向振动要求低于0.5 g。
- 2) 实际工程中要求所有轴振动强度在±0.1g之内。

若以上问题都考虑了，那么只需要再考虑其他减振手段了

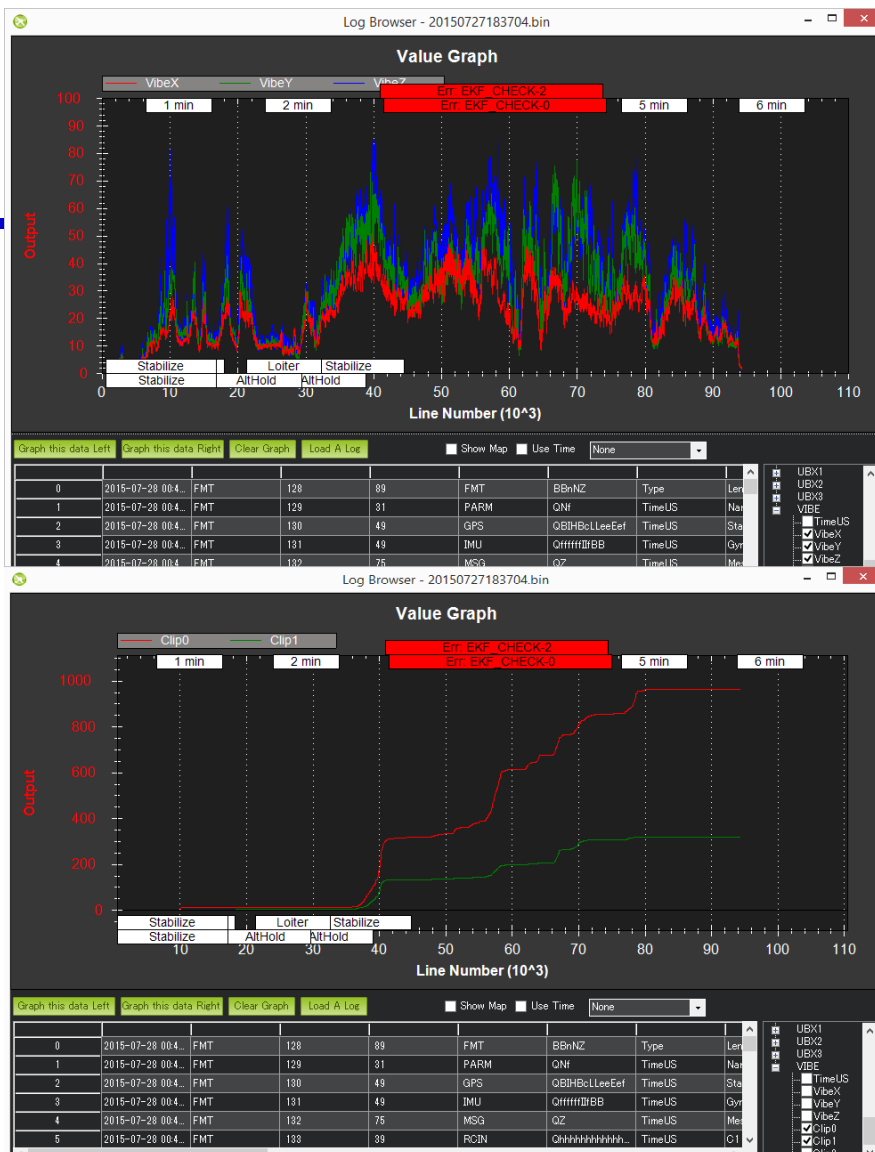


图3.16: 噪声大时的位置估计，来源网站 ardupilot.org



2.结构设计

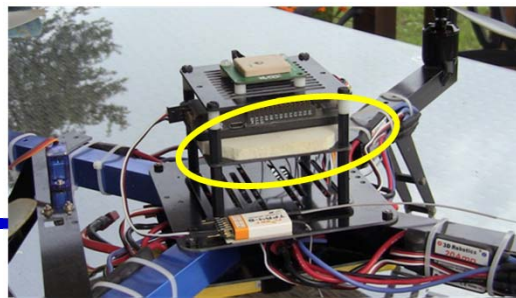
□ 减振设计

(4) 自驾仪与机架的隔振

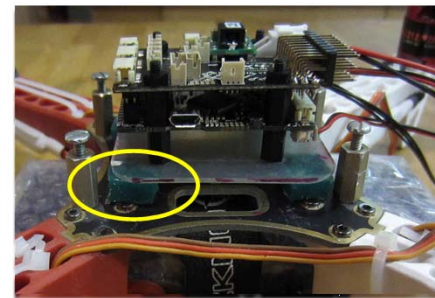
1) 传统做法上，双面泡沫胶带和尼龙扣已被应用于把自驾仪固定在机架上。

2) 在许多情况下，因为自驾仪质量很小，导致泡沫胶带或尼龙扣不能起到足够的减振作用。如右图，已被测试过的可行的隔振方案有：**Dubro**泡沫、凝胶垫、O形环悬挂安装和耳塞式安装等。

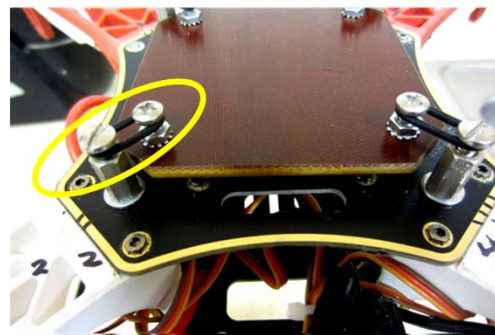
3) 目前市面上也有飞控减振器，。它由2块玻纤支架，4个减震球和2块泡沫棉胶垫组成。



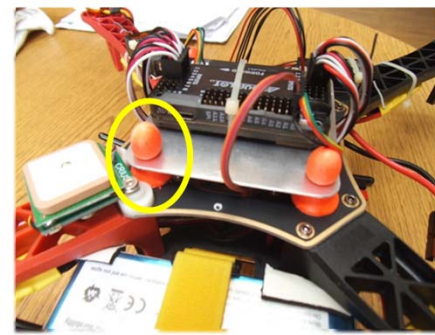
(a) 泡沫



(b) 凝胶垫



(c) O型环



(d) 耳塞式

图3.17: 隔振方案,来源 ardupilot.org



图3.08: 减振器



2.结构设计

□ 减噪设计

(1) 螺旋桨噪声的主要危害

- 1) 多旋翼机身将处于螺旋桨所直接辐射的声场中，各灵敏传感器可能会受到噪声的影响而失真。
- 2) 噪声影响周围飞行环境，产生噪声污染。特别是多旋翼在居民区飞行时产生的噪音。
- 3) 若考虑不周，螺旋桨辐射的噪声所诱发的机体结构振动与声疲劳，有可能严重影响飞机的安全性。
- 4) 小型多旋翼出于隐秘侦查的需求，需要保持飞行时的足够安静。



2.结构设计

□ 减噪设计

(1) 螺旋桨发声原理

1) 旋转噪声

- 具有一定厚度的螺旋桨桨叶周期性地扫过周围空气介质，并导致空气微团的周期性非定常运动，于是就产生了**厚度噪声**；
- **负载噪声**是拉力噪声与阻力噪声的组合，是由于桨叶叶面的压力场变化而引起的。

2) 宽带噪声

螺旋桨的宽带噪声是由桨叶与湍流之间相互作用产生的桨叶负载随机变化引起。

对于飞行器螺旋桨和各类叶轮机械来说，其共同特征是由旋转叶片发声。高速旋转的螺旋桨会导致气流脉动的产生，而强烈脉动的气流会以噪声的形式向外释放。一般而言，螺旋桨噪声可进一步区分为旋转噪声和宽带噪声。



2.结构设计

□ 减噪设计

(2) 减噪措施

- 1) 对于多旋翼来说增大**桨距**或**桨叶直径**可以有效减小叶尖速度，从而减弱桨叶叶尖失速产生的噪声；
- 2) 通过减小桨叶的总体积，我们就可以减小桨叶剖面的相对**厚度**和弦长，从而大幅度降低厚度噪声；
- 3) 对于给定的拉力设计要求，增加螺旋**桨叶数**可以减小叶片尺寸和转速，从而降低翼尖线速度，减弱叶片的噪声辐射；
- 4) 通过设计改进**桨叶形状**，将噪声功率向内径方向移动来实现降噪；
- 5) 机载的声传感器可以探测到某个螺旋桨所产生的噪声，通过**闭环反馈**，系统可以利用另一个螺旋桨进行相应的抗噪，从而抵消所产生的噪声



3.本讲小结

- (1) 设计有特色的飞行器构型，让人容易识别。
- (2) 减振方面，因为机体振动主要来源于机架变形、电机和螺旋桨不对称，所以在机架重量和尺寸相同情况下，尽量保证机架拥有更强的刚度，选择做工优良的电机和螺旋桨。为了防止针对对飞控或者摄像设备的影响，需要进一步考虑加入减振云台。
- (3) 在减噪方面，主要通过设计新型的螺旋桨来达到。

这一讲，我们仅仅给出了一些设计原则，而没有具体的设计方法。那么，在同等性能要求下，**如何设计阻力最小、振动最小、噪声最小的多旋翼呢？**在多旋翼外型大同小异的今天，这些可能就是未来可以改进的方向之一。



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>

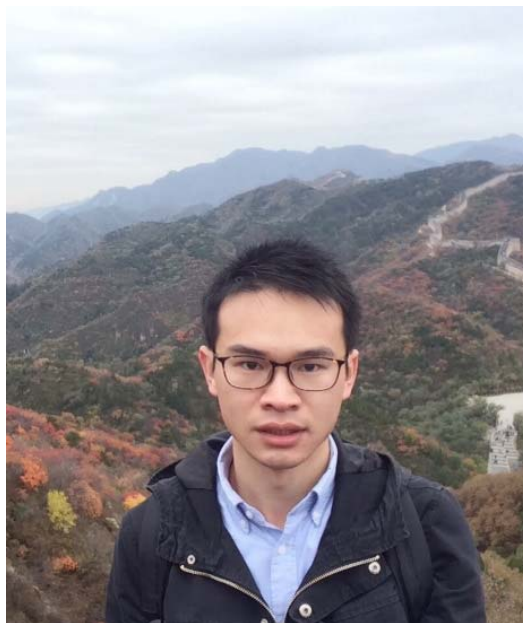
(5) 同名中文书本教材《多旋翼飞行器设计与控制》即将在电子工业出版社出版, 敬请期待

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



致谢

感谢控制组同学



戴训华

为本节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。