



多旋翼飞行器设计与控制

第三讲 多旋翼布局和结构设计

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

2016年3月24日 北航主南401



前言

东方智慧： 中国古人很早就认识到巧妙的结构设计有助于可靠性。赵州桥建于隋代（公元581-618年）大业年间（公元605-618年），由著名匠师李春设计和建造，距今已有约1400年的历史。赵州桥非常雄伟。桥长五十多米，有九米多宽，中间行车马，两旁走人。这么长的桥，全部用石头砌成，下面没有桥墩，只有一个拱形的大桥洞，横跨在三十七米多宽的河面上。大桥洞顶上的左右两边，还各有两个拱形的小桥洞。平时，河水从大桥洞流过，发大水的时候，河水还可以从四个小桥洞流过。这种设计，在建桥史上是一个创举，既减轻了流水对桥身的冲击力，使桥不容易被大水冲毁，又减轻了桥身的重量，节省了石料。



图片来源<http://www.yaoyouke.com/>



前言

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. 小结

4. 作业



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，

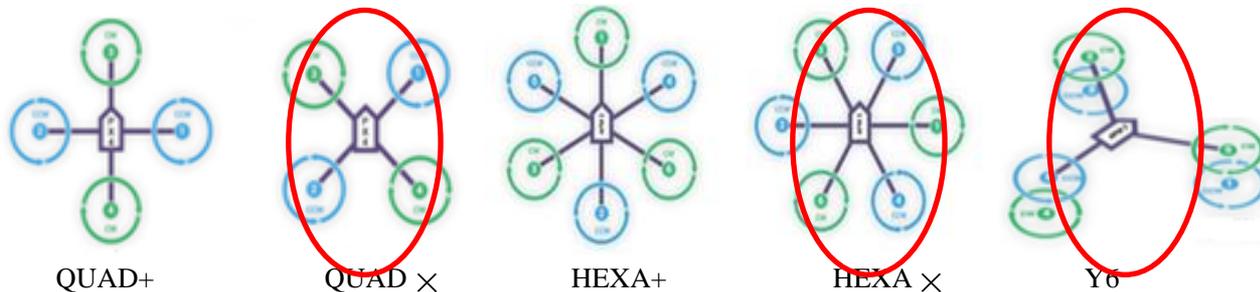
又分为+字型和X字型。

目前常用的X字型结构。

机动性更强(为什么?)，

且前视相机的视场角不容

易被遮挡。



(a) 四旋翼

(b) 六旋翼



(c) 八旋翼

图. 多旋翼基本构型，图片主体来源于网站<http://ardupilot.com/>

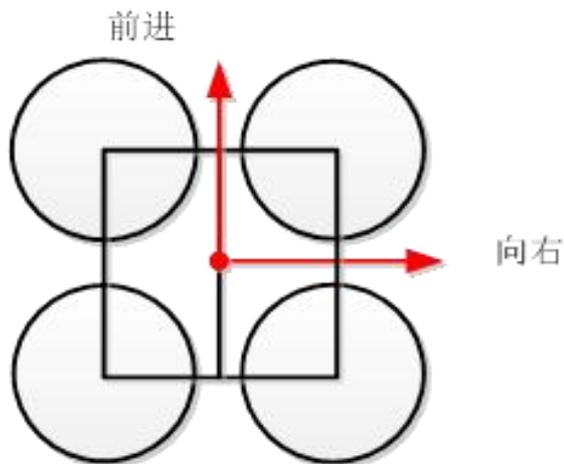


1. 布局设计

□ 机身基本布局

(2) 环型

- 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。



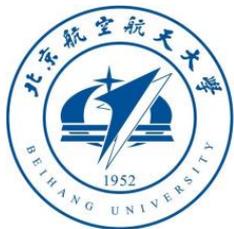
(a) 示意图



(b) 实物图

图. 环形四旋翼的结构形式，实物图照片来源于

<http://bbs.5imx.com/bbs>



1. 布局设计

上下桨转动方向相反，相互抵消陀螺力矩

□ 旋翼安装

(1) 单桨和共轴双桨

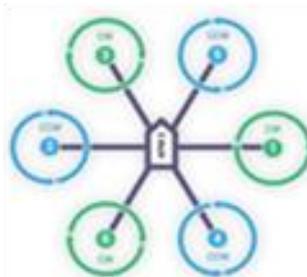
1) 共轴双桨优点

- 不增加多旋翼整体尺寸，增加载重
- 减少螺旋桨对相机视场的遮挡

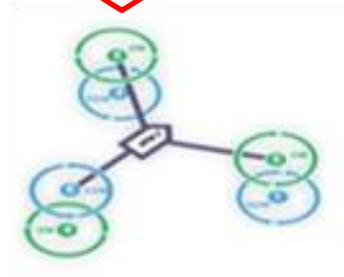
2) 注意

- 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.



(a) 一轴一桨形式



(b) 一轴双桨形式

图. 一轴一桨和一轴双桨示意图，

图片主体来源于网站<http://ardupilot.com/>

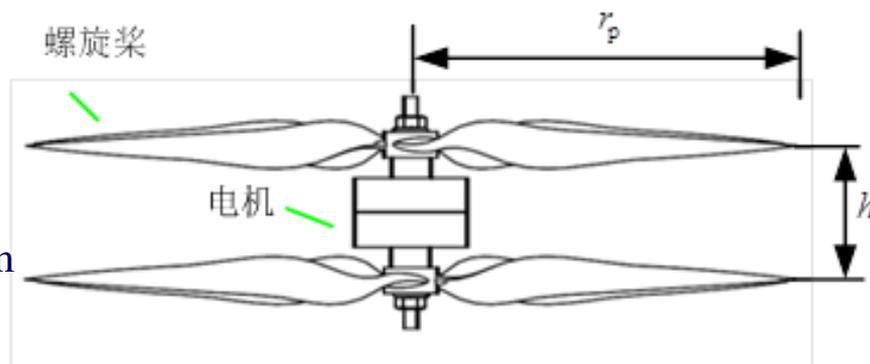


图. 共轴双桨的简单连接示意图



1. 布局设计

□ 旋翼安装

(1) 单桨和双桨

- 25kg full weight (10kg quad + 15kg payload)
- Flight time over 60 min.
- 28 inch props



Ehang (亿航) 184飞行图片

Big QuadCopter coax hammer XB8 kopterworx
， <https://www.youtube.com/watch?v=BfpfFgRTddc>



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

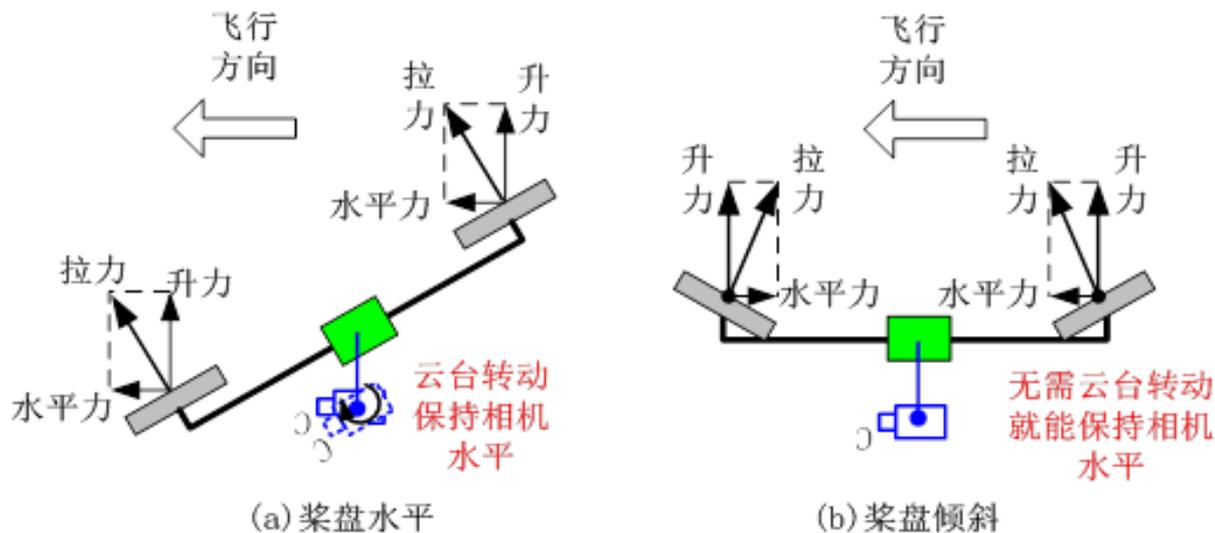


图. 桨盘水平和桨盘倾斜多旋翼的前飞方式



图. 桨盘倾斜多旋翼CyPhyLVL1

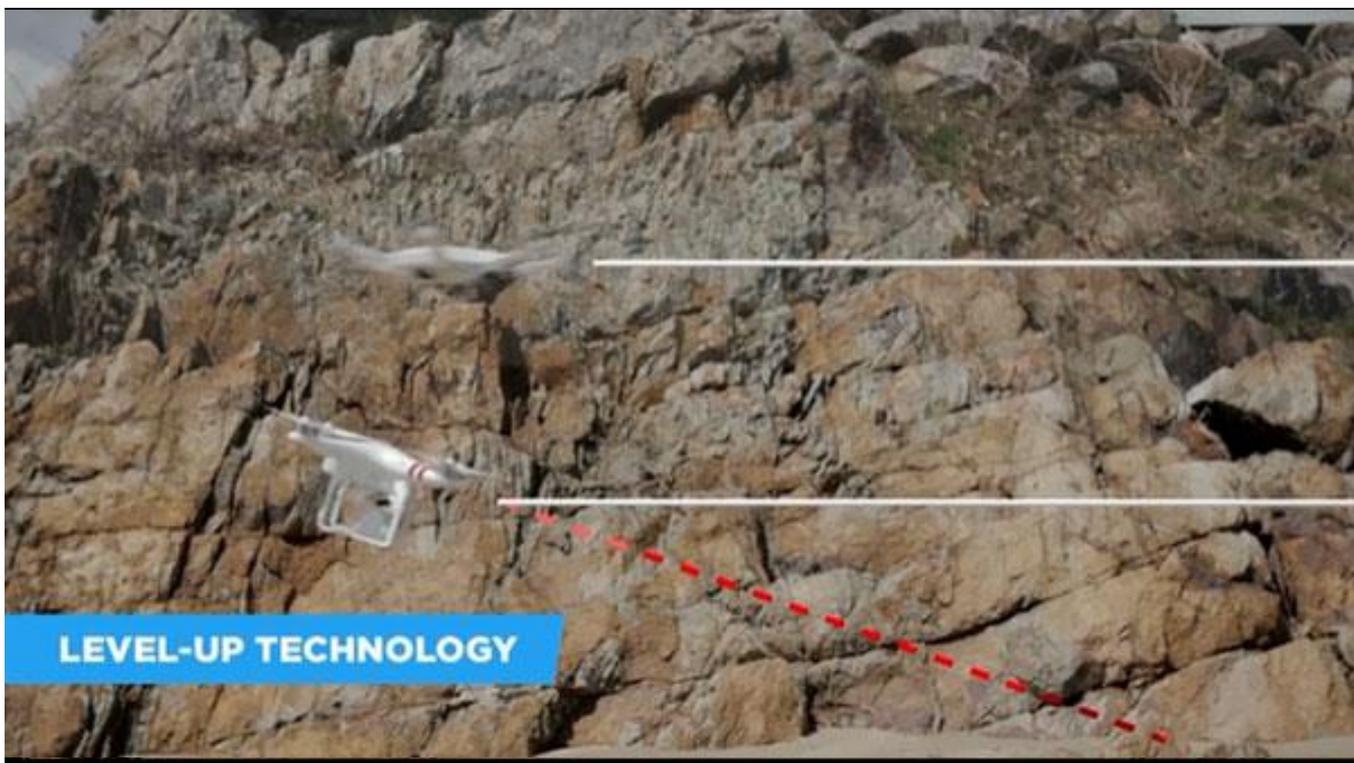


1. 布局设计

□ 旋翼安装

(2) 桨盘角度

CyPhyLVL1飞行视频





1. 布局设计

□ 旋翼安装

(3) 桨盘位于机臂位置



大疆Phantom



深圳零度Xplorer



亿航Ghost



极飞XMission

- 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

- 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

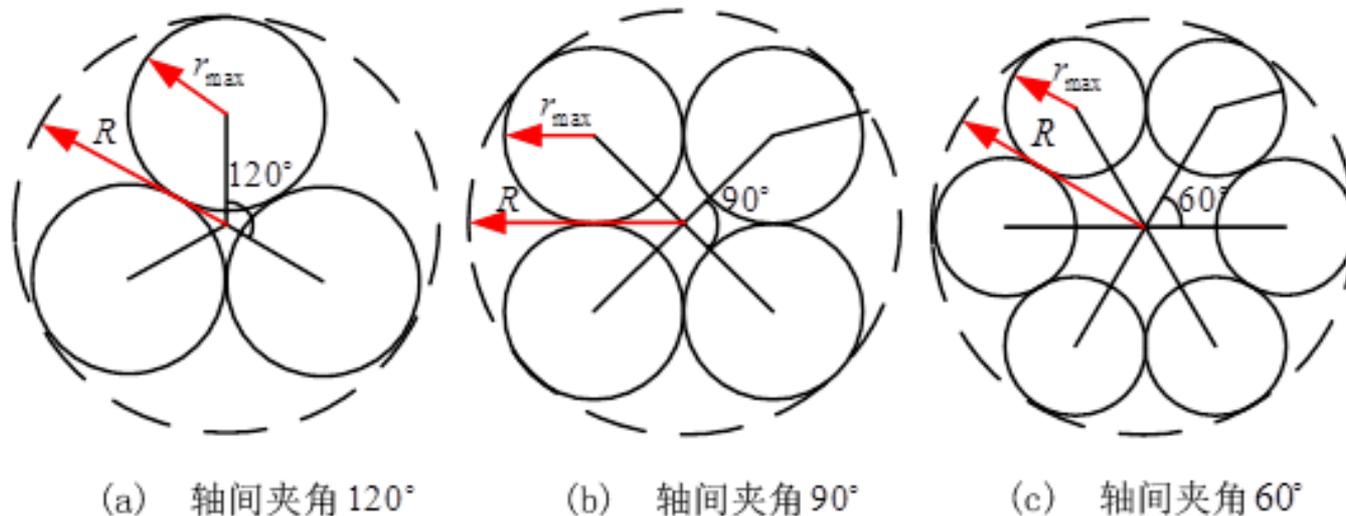


图 多旋翼机体半径与最大旋翼半径示意图

机体半径 R 与旋翼最大半径 r_{\max} 存在如下关系 (θ 表示轴间夹角)

$$R = \left(1 + \frac{1}{\sin(\theta/2)} \right) r_{\max}$$



1. 布局设计

□ 旋翼和机体半径

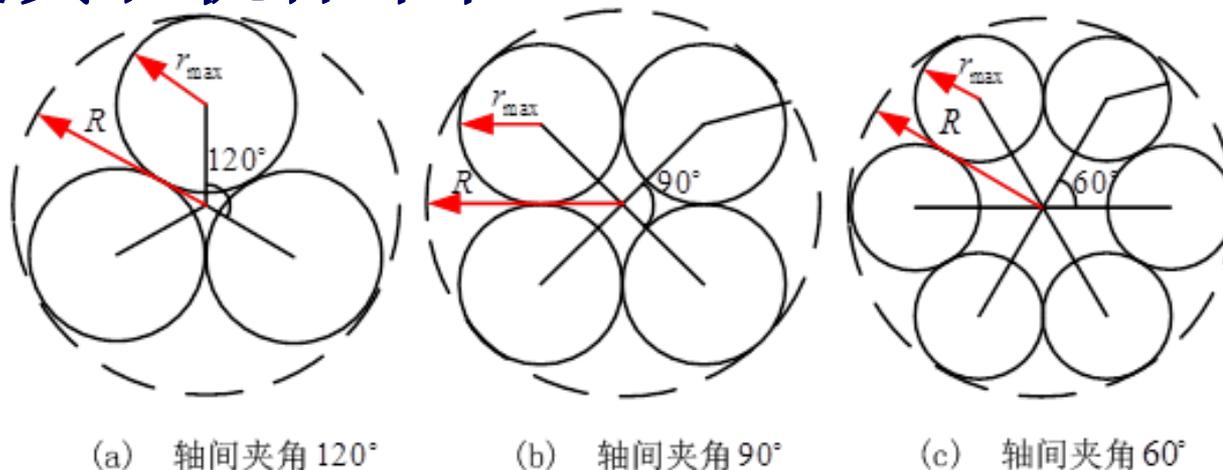


图 多旋翼机体半径与最大旋翼半径示意图

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，比如可以令

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

[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

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和线加速度。

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2\pi} C_T \rho \omega^2 (2r_p)^4 \\ M &= \frac{1}{2\pi} C_M \rho \omega^2 (2r_p)^5 \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} T &\sim \omega^2 R^4, M \sim \omega^2 R^5 \\ m &\sim R^3, J \sim R^5. \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} a &= \frac{T}{m} \sim \frac{\omega^2 R^4}{R^3} = \omega^2 R \\ \alpha &= \frac{M}{J} \sim \frac{\omega^2 R^5}{R^5} = \omega^2 \end{aligned}$$

(1) 马赫数常数限制

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

(2) 弗劳德数限制

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

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



(b) 重心在上

图 Freefly多旋翼的两种相机安装方式



Freefly多旋翼视频, 来源<https://www.youtube.com/watch?v=Ww3M7aoCf5A>

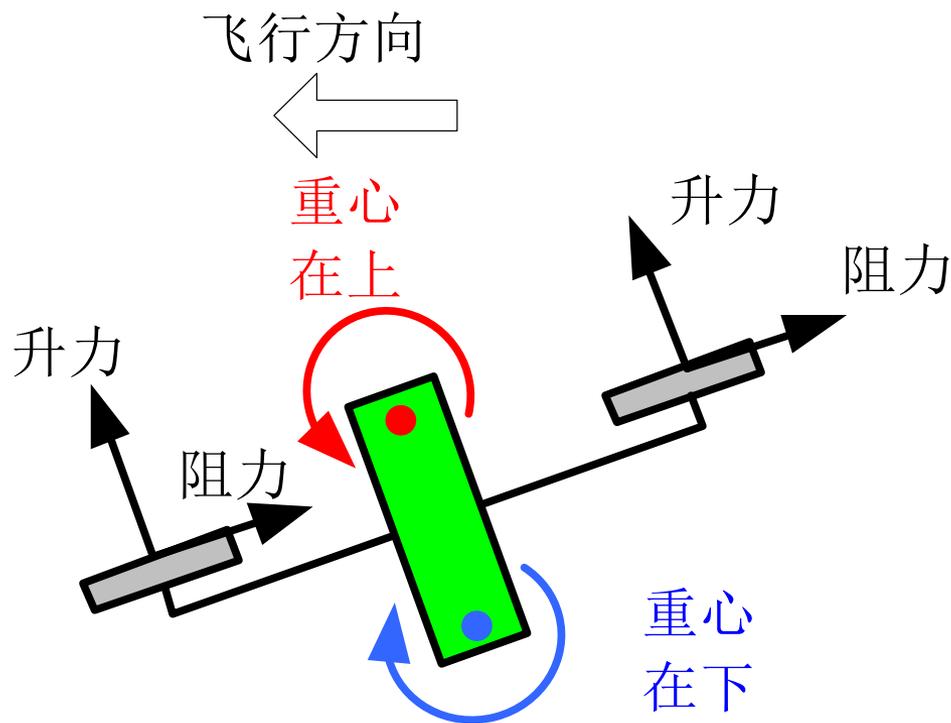


1. 布局设计

□ 重心位置

(1) 多旋翼前飞情形

- 在右图中，因为螺旋桨的柔性，诱导的来流会产生阻力。
- 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。
- 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) 飞行器前飞情形

图 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，因为螺旋桨的柔性，诱导的来流会在产生阻力。
- 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。
- 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超0度方向发展。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。

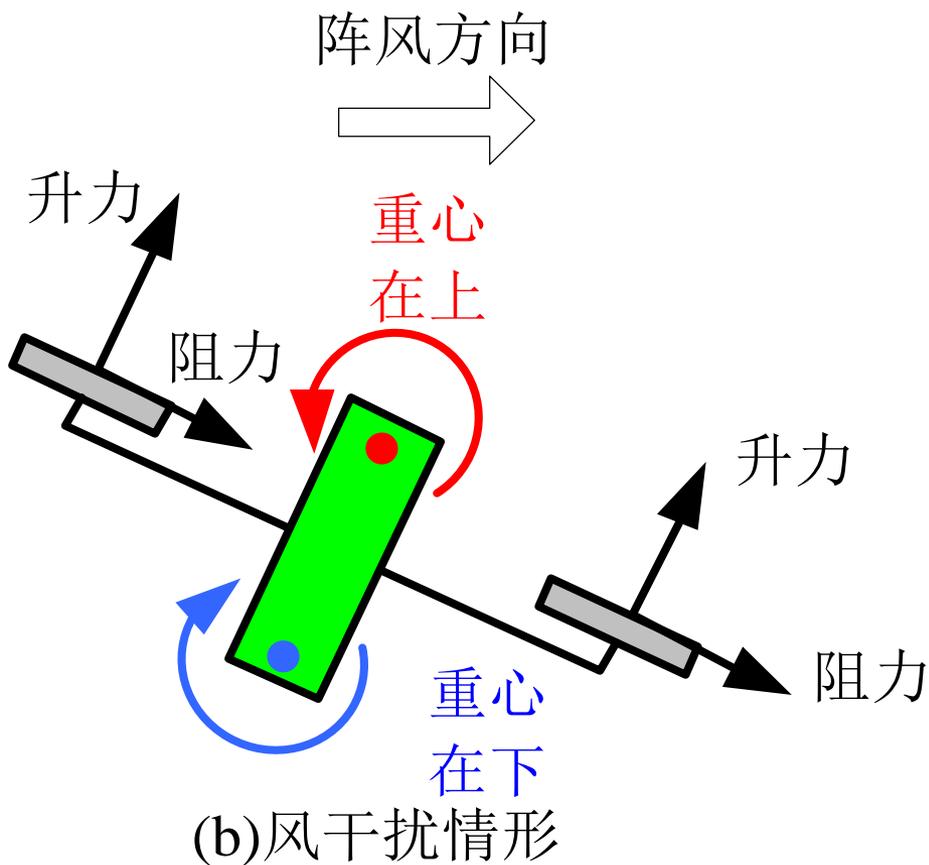


图 多旋翼受力简化图



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，实际中建议将重心配置在飞行器桨盘周围，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]。

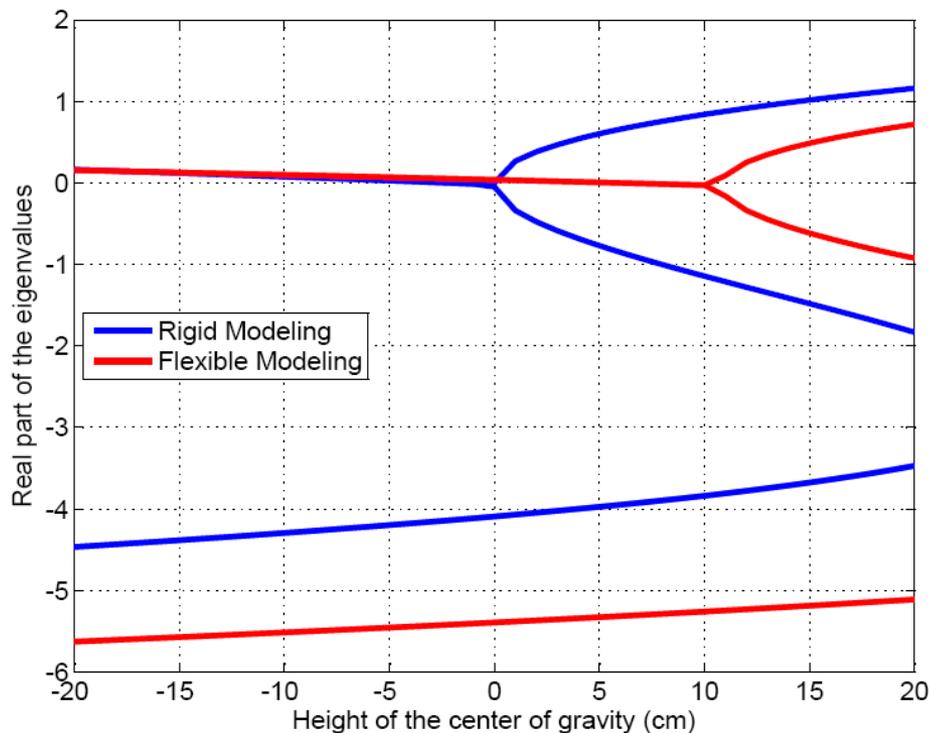


图 重心高度与稳定性的关系[3, Fig.7]

[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重心。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

工业自驾仪一般都会有白色箭头标定正方向，安装自驾仪时使白色箭头直接指向飞行器的正前方。安装时，自



驾仪应尽量被安置于离飞行器的水平和竖直重心较近的地方。一般情况下离飞行器中心就几厘米以内，并且与电机水平

(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，可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

因此它与物体的迎风面积有很大关系，迎风面积越大，压差阻力也越大。物体的形状也对压差阻力影响很大。如图所示的三个物体，平板的压差阻力最大，球体次之，而流线体的最小，就压差阻力而言可以是平板压差阻力的1/20。

(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。

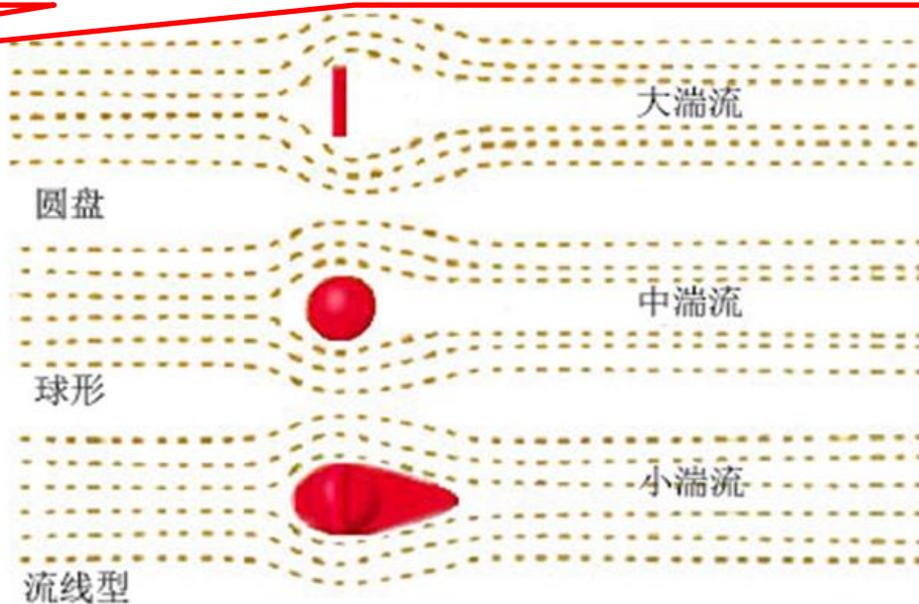
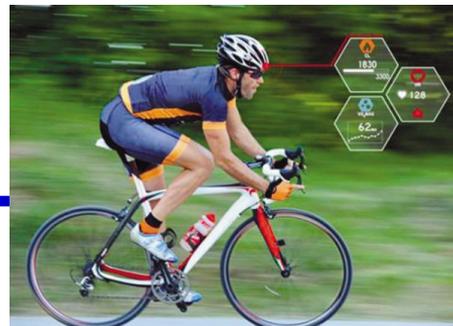


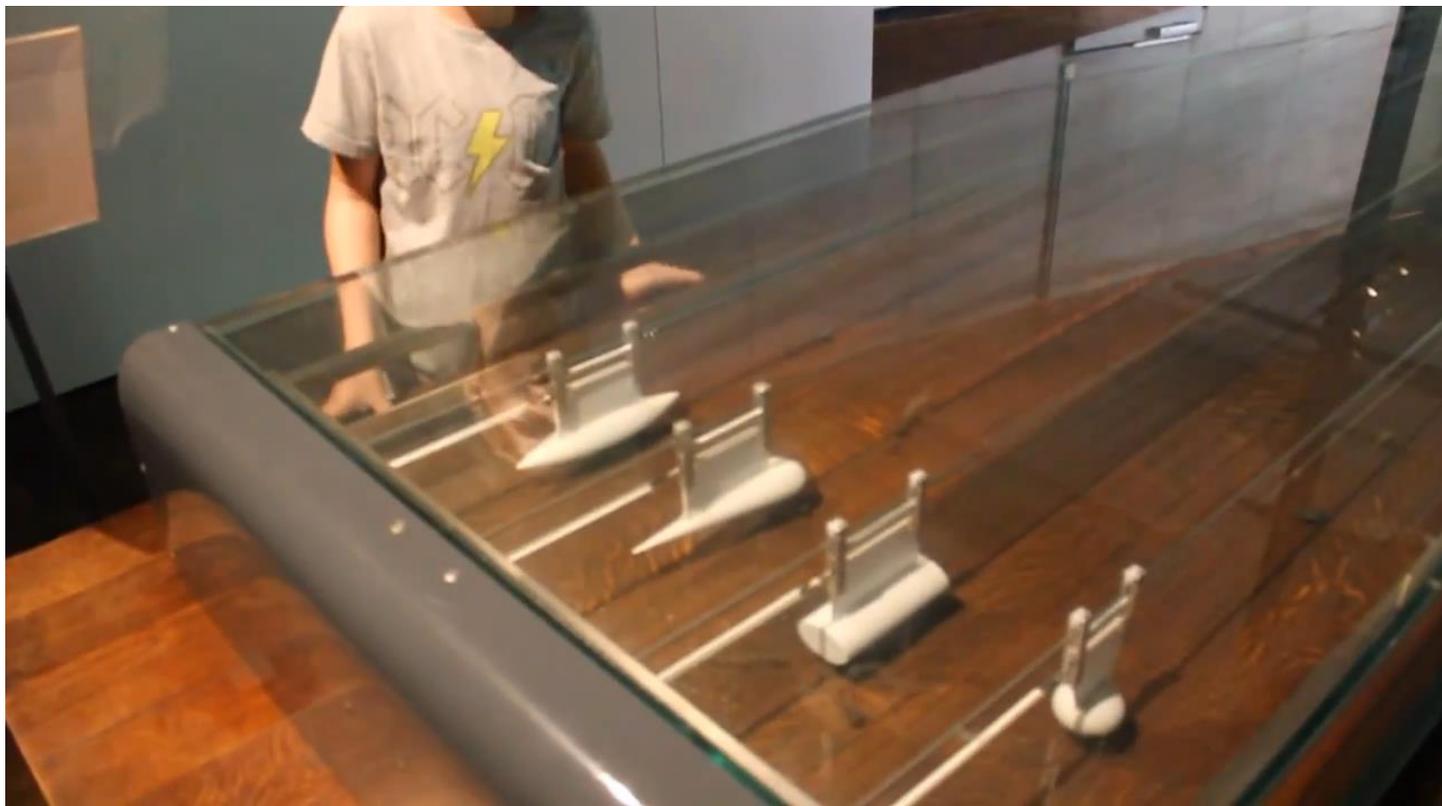
图 压差阻力示意图



1. 布局设计



□ 气动布局



Understanding aerodynamic drag dependency of shape. <https://www.youtube.com/watch?v=2ArW-sA8NsQ>



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) 大疆悟



(b) 极飞极侠



(c) AR.Drone



(d) DHL送货四旋翼

图 一些商业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。

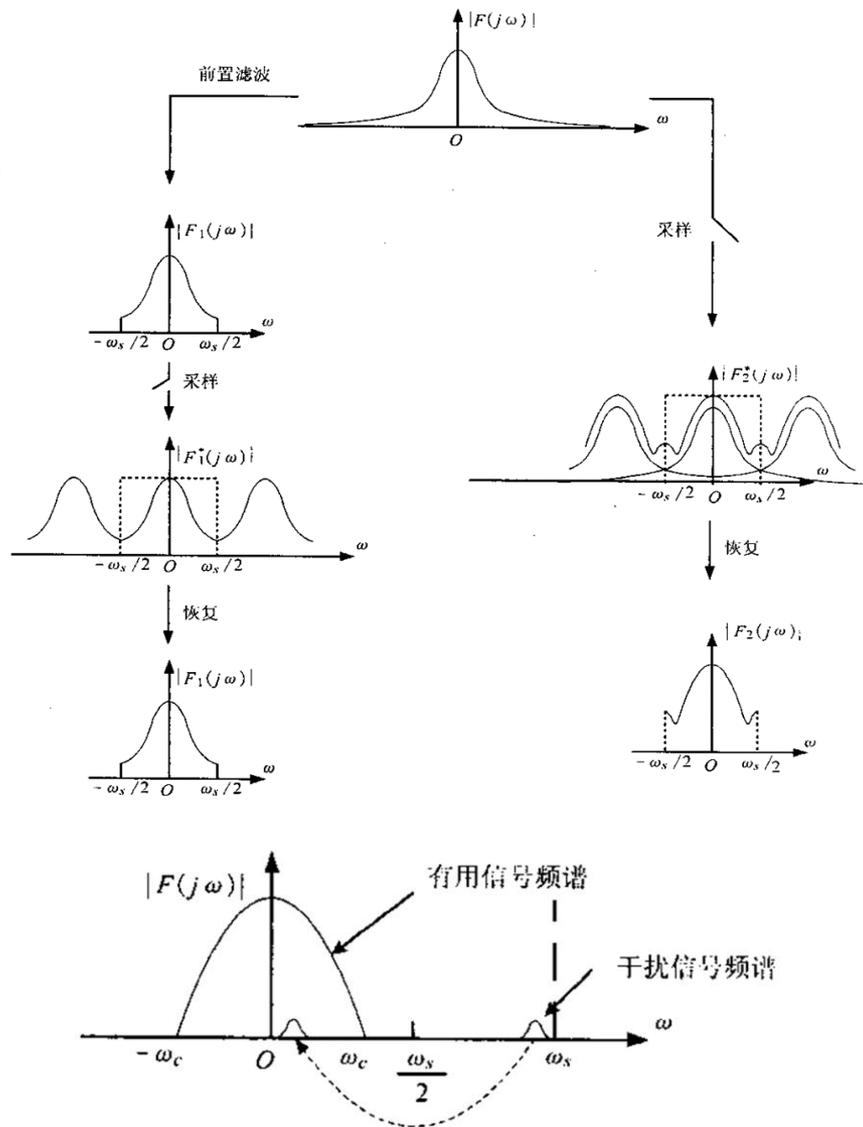


2. 结构设计

减振设计

(1) 减振意义

因此，在安装加速度计时，需要进行低通机械或者数字滤波。大多数多旋翼飞控板，在MEMS加速度计上都配有一个模拟抗锯齿滤波器，在信号采样之前要经过电子电路滤波。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。



[4]高金源.计算机控制系统.高等教育出版社,2004年. 图 前置滤波器滤除高频干扰, 图片来源[4]

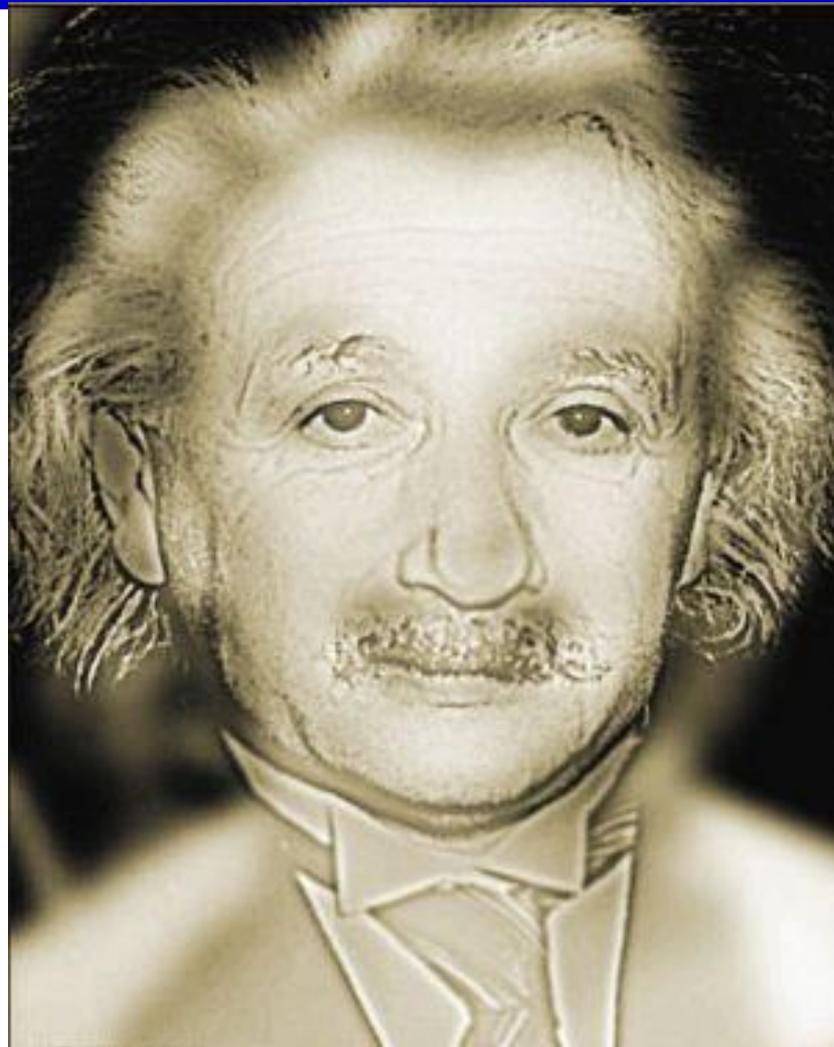


2. 结构设计

□ 减振设计

(1) 减振意义

- 理解高频和低频。美国麻省理工学院的神经科学家和英国格拉斯哥大学的专家们利用大脑对清晰和模糊画面的反应差异，制作出神奇的“玛丽莲·爱因斯坦”混合画。





2. 结构设计

□ 减振设计

(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，铝制机架更重，刚性较好；
- 要保证电机与机臂的安装连接和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



Nixie可穿戴四旋翼宣传视频, <https://www.youtube.com/watch?v=kfzqUsGMHE0>



2. 结构设计

□ 减振设计

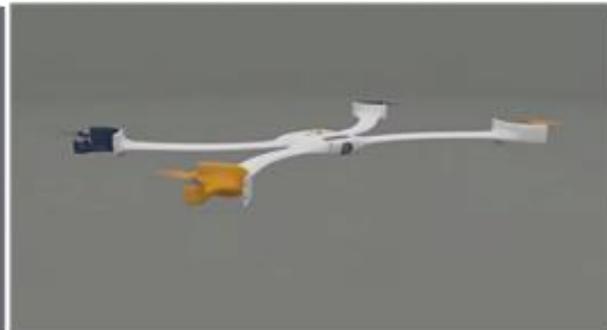
(2) 振动的主要来源

1) 机架

- 目前涌现出可穿戴四旋翼概念，然而，可穿戴要求机体柔韧可变形，这似乎违背了上面的原则。（怎么办？）



(a) 收起状态



(b) 展开状态

图. Nixie可穿戴四旋翼概念机

这需要在设计中考虑这方面的问题：容许穿戴时可变形，有需要在飞行时保证一定的刚度（拉力方向），避免振动。



2. 结构设计



Hands-On with Nixie Wearable Drone Camera, <https://www.youtube.com/watch?v=DTD1UvhYaHs>



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；
- 碳纤维螺旋桨比较合适；
- 碳纤维螺旋桨价格低、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，但是振动较大；
- 电机模块在不平衡升力时绕螺旋桨轴会产生扭转，所以低速大桨使机架韧性更差。



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 $0.5g$ 。

2) 实际工程中要求所有轴振动强度在 $\pm 0.1g$ 之内。

若以上问题都考虑了，那么只需要再考虑
自驾仪与机架之间的凝胶和泡沫隔振了

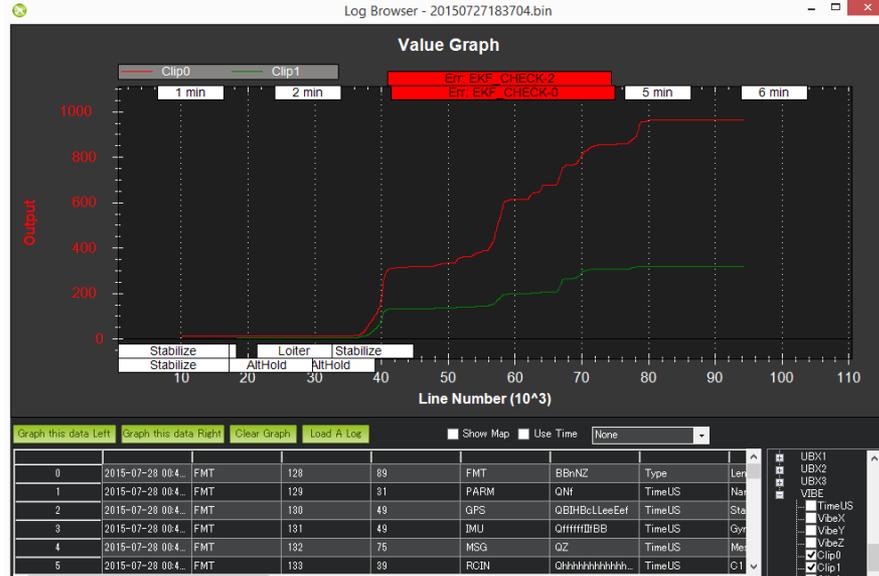
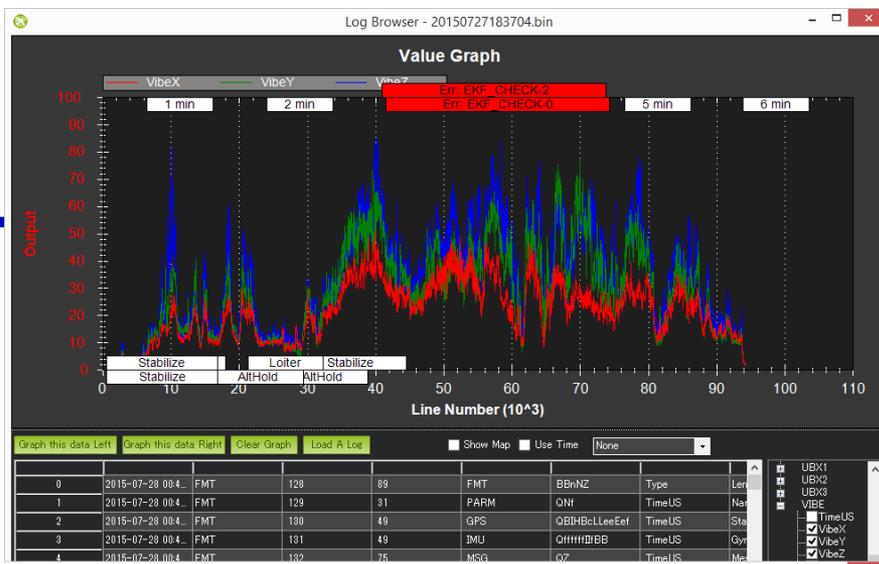


图. 噪声大时的位置估计,
<http://copter.ardupilot.com>



2. 结构设计

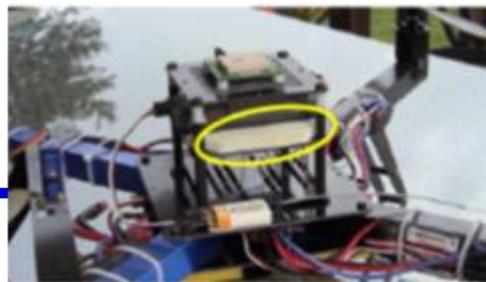
□ 减振设计

(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，因为飞行控制单元质量很小，导致泡沫胶带或尼龙扣不能起到足够的减震作用。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。

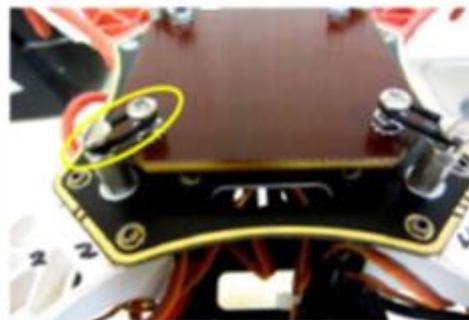
3) 目前市面上也有飞控减振器，如右图3. 14。它由2块玻纤支架，4个减震球和2块泡棉胶垫组成。



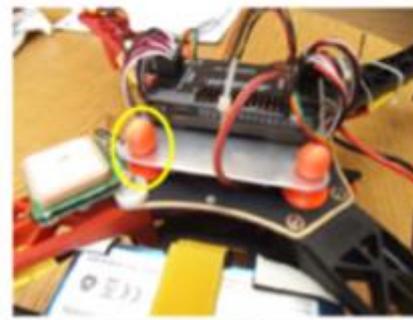
(a) 泡沫



(b) 凝胶垫



(c) O型环



(d) 耳塞

图. 隔震方案,来源<http://ardupilot.com/>



图. 飞控减振器



2. 结构设计

□ 减振设计



Quadcopter Vibration Damping Comparison - Foam Earplugs, Moongel, & Sorbothane

<https://www.youtube.com/watch?v=TMcUXRPpTJ4>

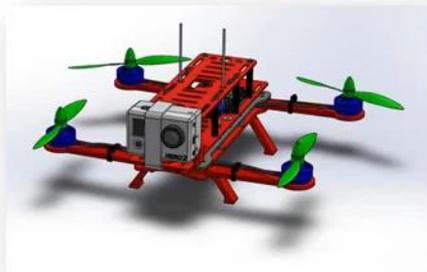


2. 结构设计

□ 减振设计



SOLIDWORKS Simulation



Vibration Analysis Presented by: Walt Bednarz



Vibration Analysis of a Quadcopter, <https://www.youtube.com/watch?v=UMCrHFmEjI0>



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

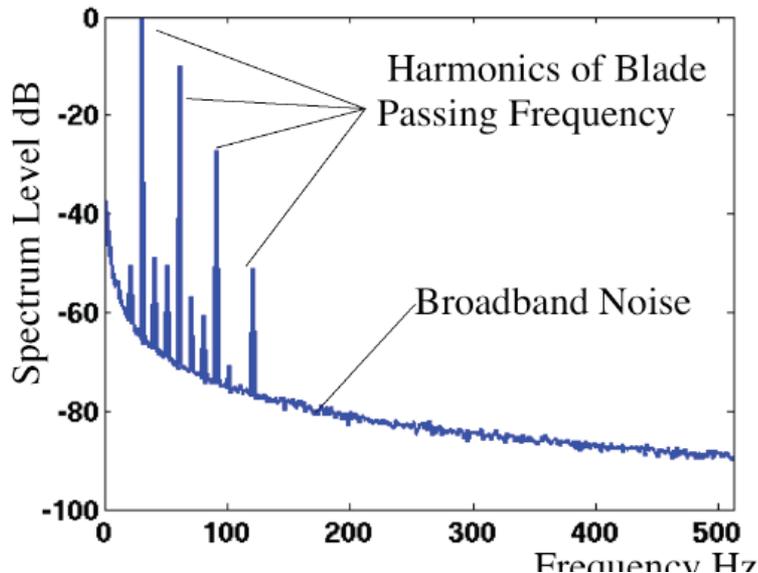
(1) 螺旋桨发声原理

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

叶片负载的随机变化，随机变化紊流由螺旋桨引起





2. 结构设计

□ 减噪设计

(2) 减噪措施

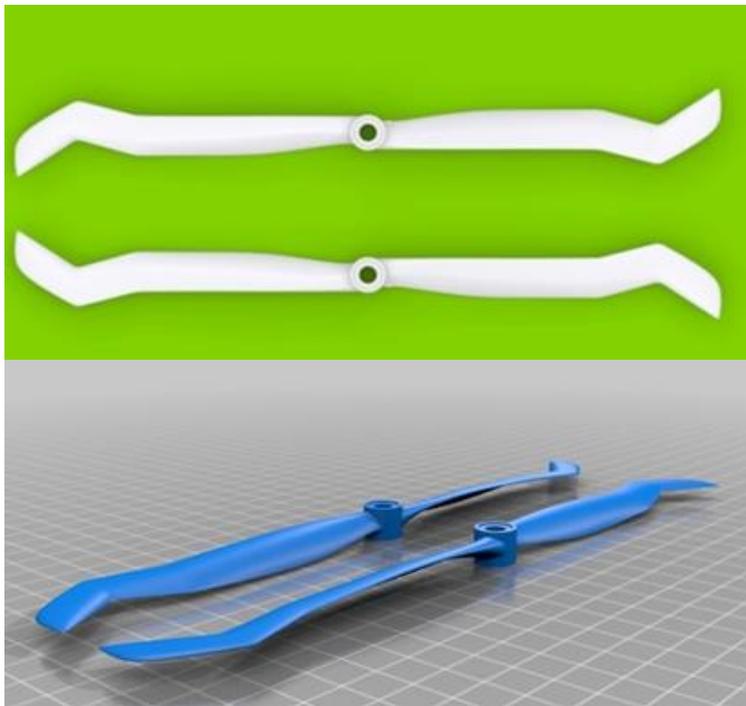
- 1) 降低叶尖相对马赫数，因为叶尖相对马赫数对螺旋桨辐射噪声的影响极为重大；
- 2) 增加螺旋桨桨叶数目，这样可以在保持拉力和功率的前提下，减小螺旋桨的外径，从而达到降低叶尖相对马赫数的目的；
- 3) 改进沿展向桨叶形状，因为从噪声的声功率沿径向分布来看，叶尖部位最高。通过设计，将气动负载沿展向分布的峰值向内径方向移动，有可能实现降噪。
- 4) 减小桨叶的总体积，这样就能减小桨叶剖面的相对厚度和弦长，从而大幅度降低厚度噪声。



2. 结构设计

□ 减噪设计

(3) 降噪的螺旋桨



Impressive: Building A Silent Helicopter Blade “The new blade shape is combined with another technology called Blue Pulse, which adds three flaps to the edge of the rotor blades. These flaps move up and down at 15 to 40 times per second, using piezoelectric motors that also help to reduce the blade-vortex interaction.”

<http://geekologie.com/2010/02/impressive-building-a-silent-h.php>

图. 降噪的螺旋桨设计(未证实, 来源<http://www.thingiverse.com/thing:43488>)



3. 小结

- (1) 设计有特色的飞行器构型，让人容易识别。比如：通过桨盘倾斜的多旋翼CyPhy LVL1就很有特色。
- (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。

这一章，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。



4. 作业

作业 3.

(1) 较详细总结如何用软件对3D模型进行振动分析，以及对减振设计的启发。

大作业(下节课还有一个大作业，设计大作业选做一个)。

(1) 找一个多旋翼3D模型，参照视频完成振动分析，并写成报告。



下堂课预告

第四讲 多旋翼动力系统性能建模和估算

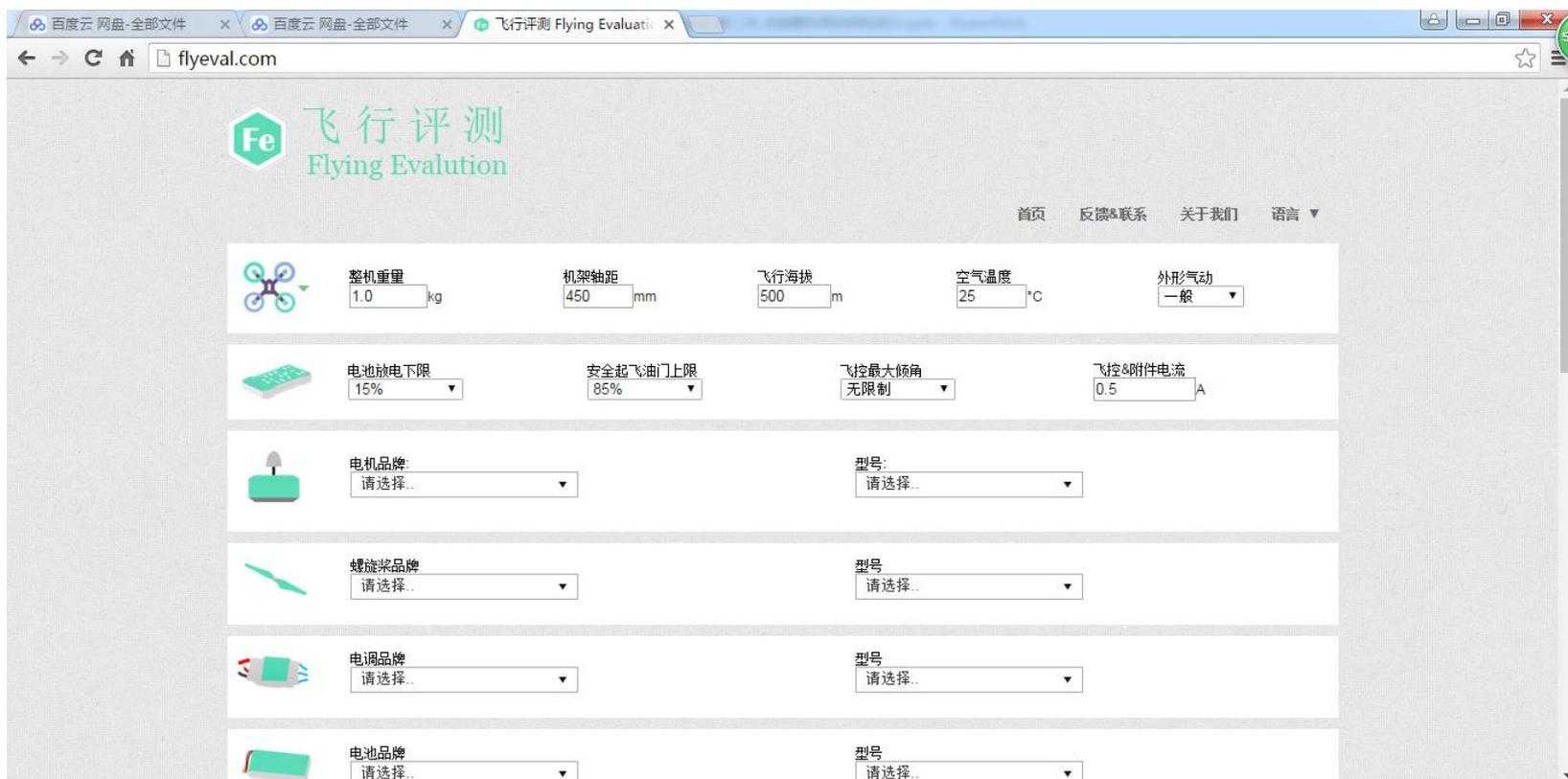
核心问题：

如何估算一架多旋翼飞行器的悬停时间、
最大负载重量和飞行距离等飞行性能？



下堂课预告

请同学们提前了解我们研究组自主开发的 www.flyeval.com
熟悉动力系统相关知识





- (1) 课程中心 (课件、资料、作业等)
- (2) 可靠飞行控制研究组主页 (课件等)

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

(3) 关注可靠飞行控制研究组公众号 buaarfly



(4) 加入课程官方交流群获取更多的资料分享



群名称: 多旋翼设计与控制交流
群号: 183613048



谢谢!