

多旋翼飞行器：从原理到实践

第三讲 机架设计和参数测量

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



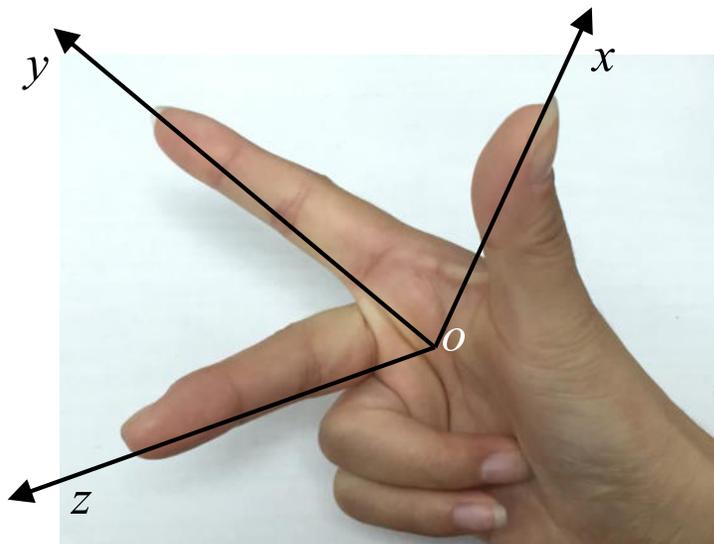
1. 坐标系和欧拉角
2. 布局设计
3. 结构设计
4. 重心和转动惯量测试
5. 本讲实践
6. 本讲小结

1. 坐标系和欧拉角

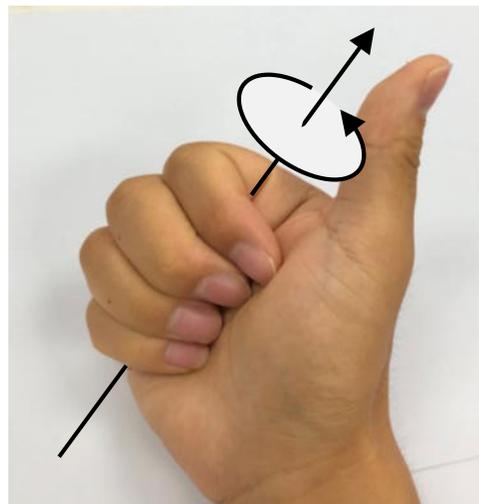
坐标系



(1) 右手法则



(a) 坐标轴



(b) 旋转正方向

如所上图示，右手的拇指指向 x 轴的正方向，食指指向 y 轴的正方向，中指所指示的方向即是 z 轴的正方向。进一步，如上图所示，要确定轴的正旋转方向，用右手的大拇指指向轴的正方向，弯曲手指。那么手指所指示的方向即是轴的正旋转方向。

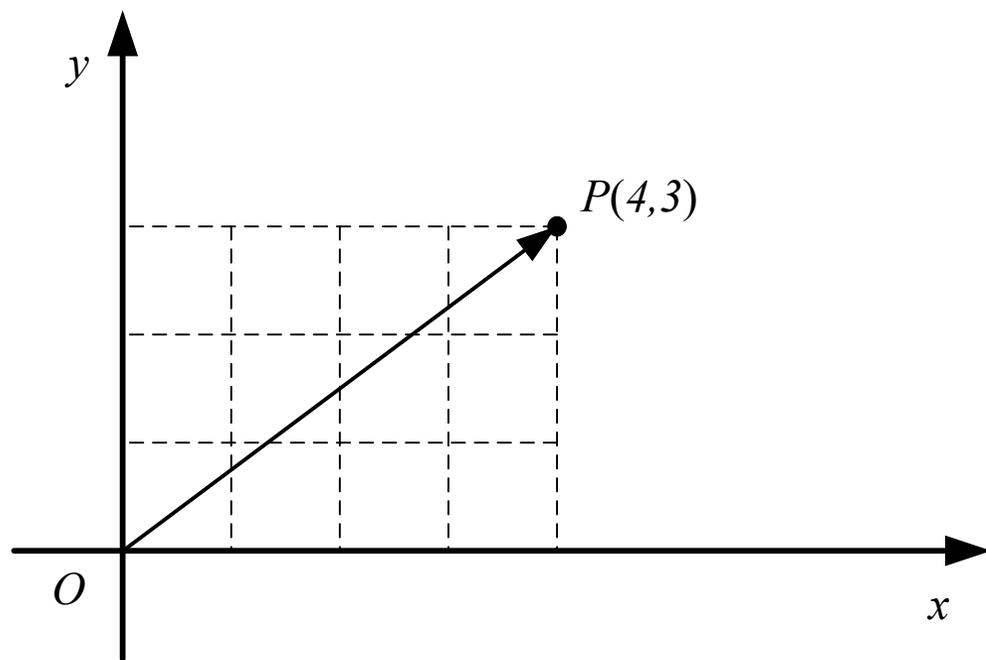
本章采用的坐标系和后面定义的角度正方向都是沿用**右手定则**。

1. 坐标系和欧拉角

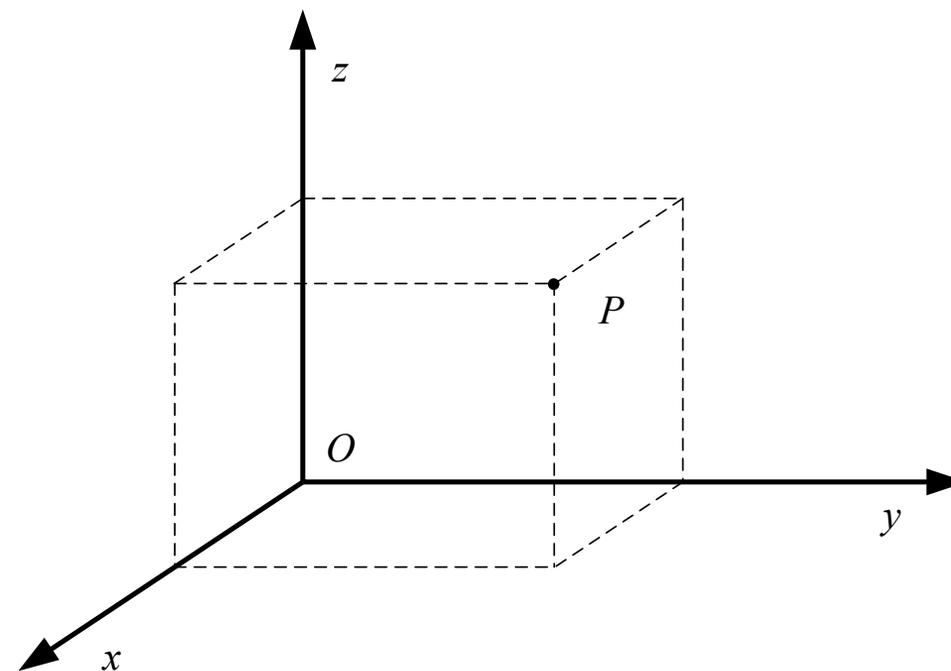
坐标系



(2) 平面直角坐标系和空间直角坐标系



平面直角坐标系



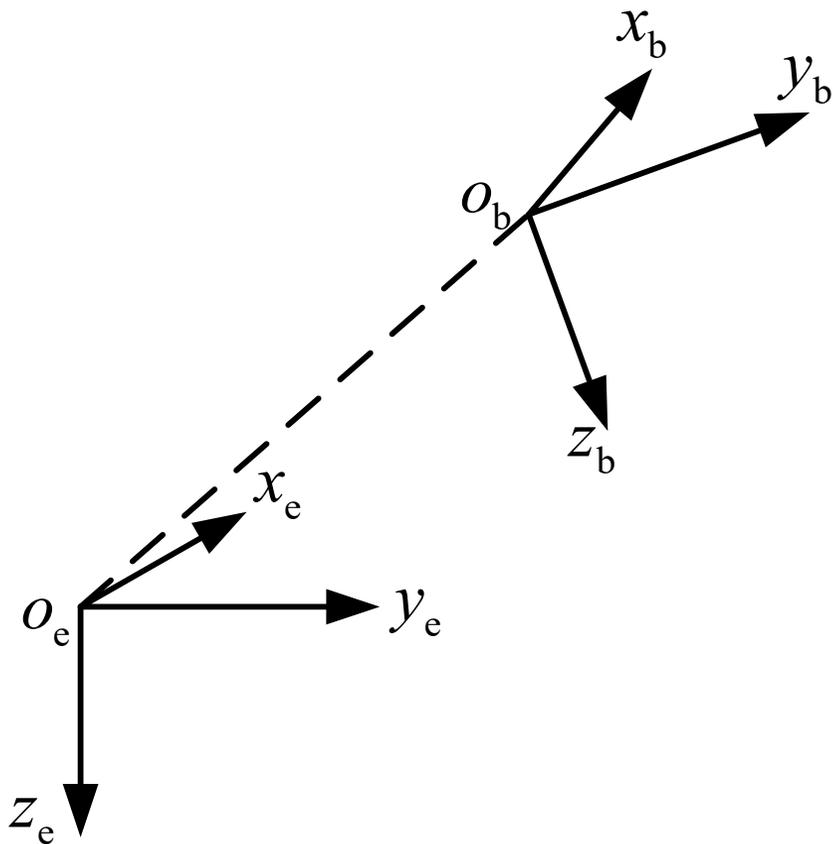
空间直角坐标系

1. 坐标系和欧拉角



坐标系

(3) 地球固联坐标系与机体坐标系定义



机体坐标系与地面坐标系的关系图

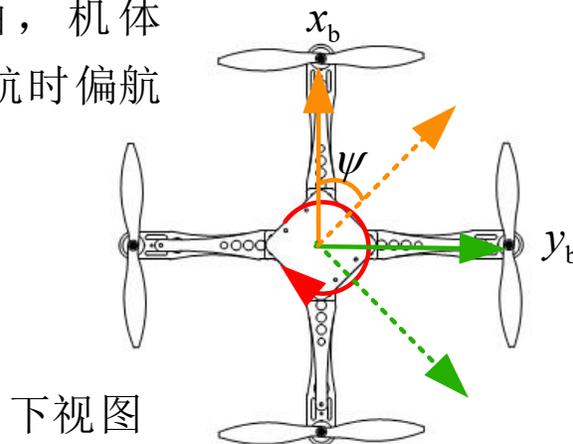
- **地球固联坐标系** 用于研究多旋翼飞行器相对于地面的运动状态，确定机体的空间位置坐标。它忽略地球曲率，即将地球表面假设成一张平面。在地面上选一点 O_e 作为多旋翼飞行器起飞位置。先让 x_e 轴在水平面内指向某一方向， z_e 轴垂直于地面向下。然后，按右手定则确定 y_e 轴。
- **机体坐标系**，其原点 O_b 取在多旋翼的重心上，坐标系与多旋翼固连。 x_b 轴在多旋翼对称平面内指向机头（机头方向与多旋翼十字形或X字形相关）。 z_b 轴在飞机对称平面内，垂直 x_b 轴向下。然后，按右手定则确定 y_b 轴。
- **右下标e表示Earth，下标b表示Body**

1. 坐标系和欧拉角

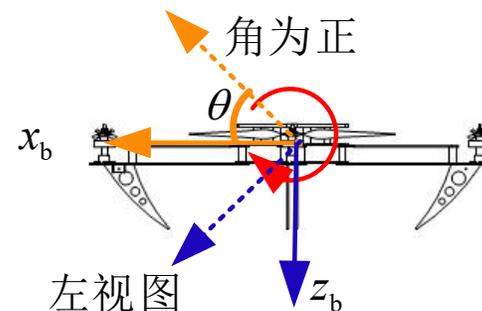


欧拉角

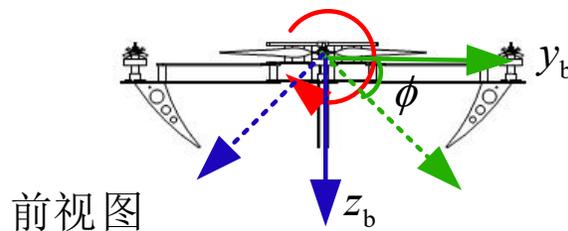
绕z轴，机体
向右偏航时偏航
角为正



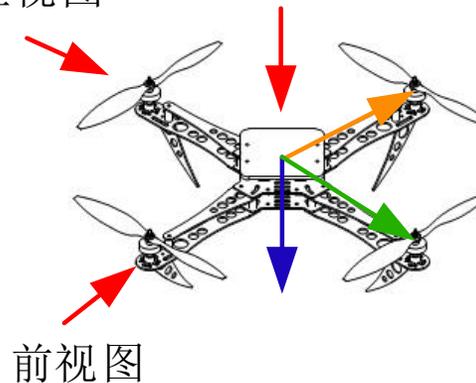
绕y轴，机体
向上俯仰时俯仰
角为正



绕x轴，机体向右
滚转时滚转角为正



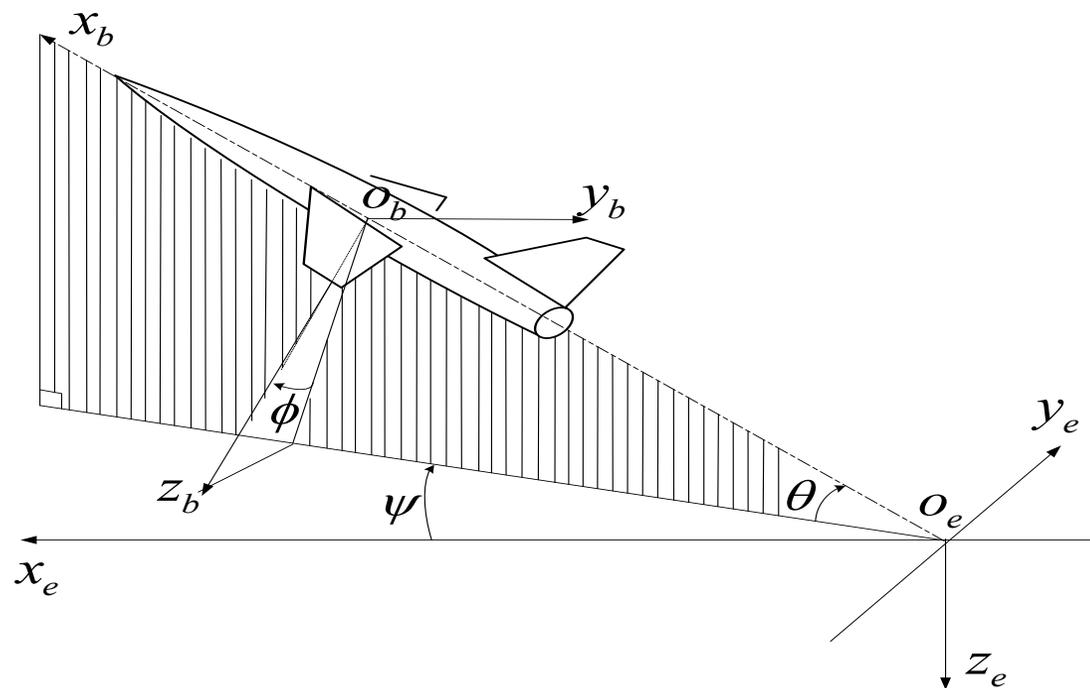
左视图 下视图



欧拉角直观表示示意图(x轴黄色，y轴绿色，z轴蓝色)

1. 坐标系和欧拉角

欧拉角



固定翼飞机欧拉角示意图

机体坐标系与地面地球固联坐标系之间的夹角就是飞机的姿态角，又称**欧拉角**：

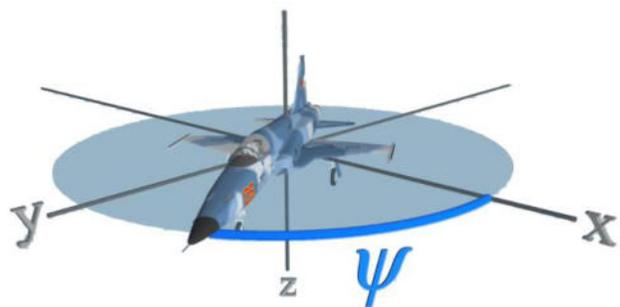
- **俯仰角 θ** ：机体轴与地平面（水平面）之间的夹角，飞机抬头为正。
- **偏航角（方位角） ψ** ：机体轴在水平面上的投影与地轴之间的夹角，以机头右偏为正。
- **滚转角（倾斜角） ϕ** ：飞机对称面绕机体轴转过的角度，右滚为正。

1. 坐标系和欧拉角

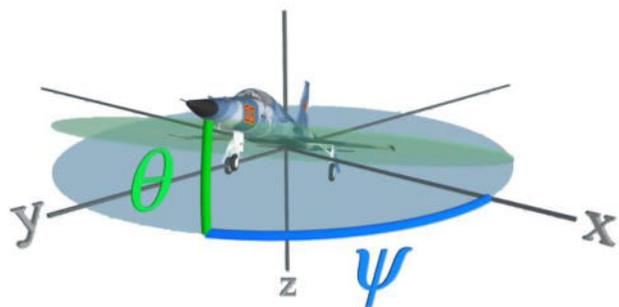
欧拉角



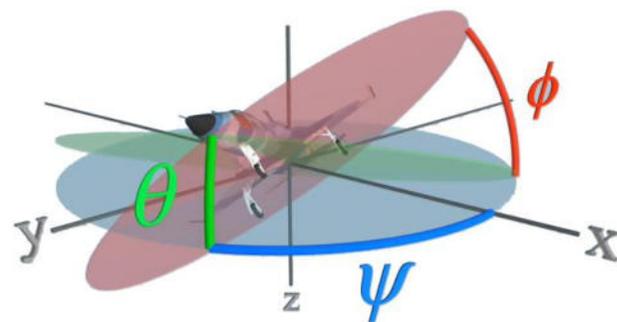
可以通过转换绕机体的 z 、 y 和 x 轴分别旋转欧拉角 φ 、 θ 和 ψ ，将地球固联坐标系转动到机体坐标系



(a) 偏航角



(b) 俯仰角

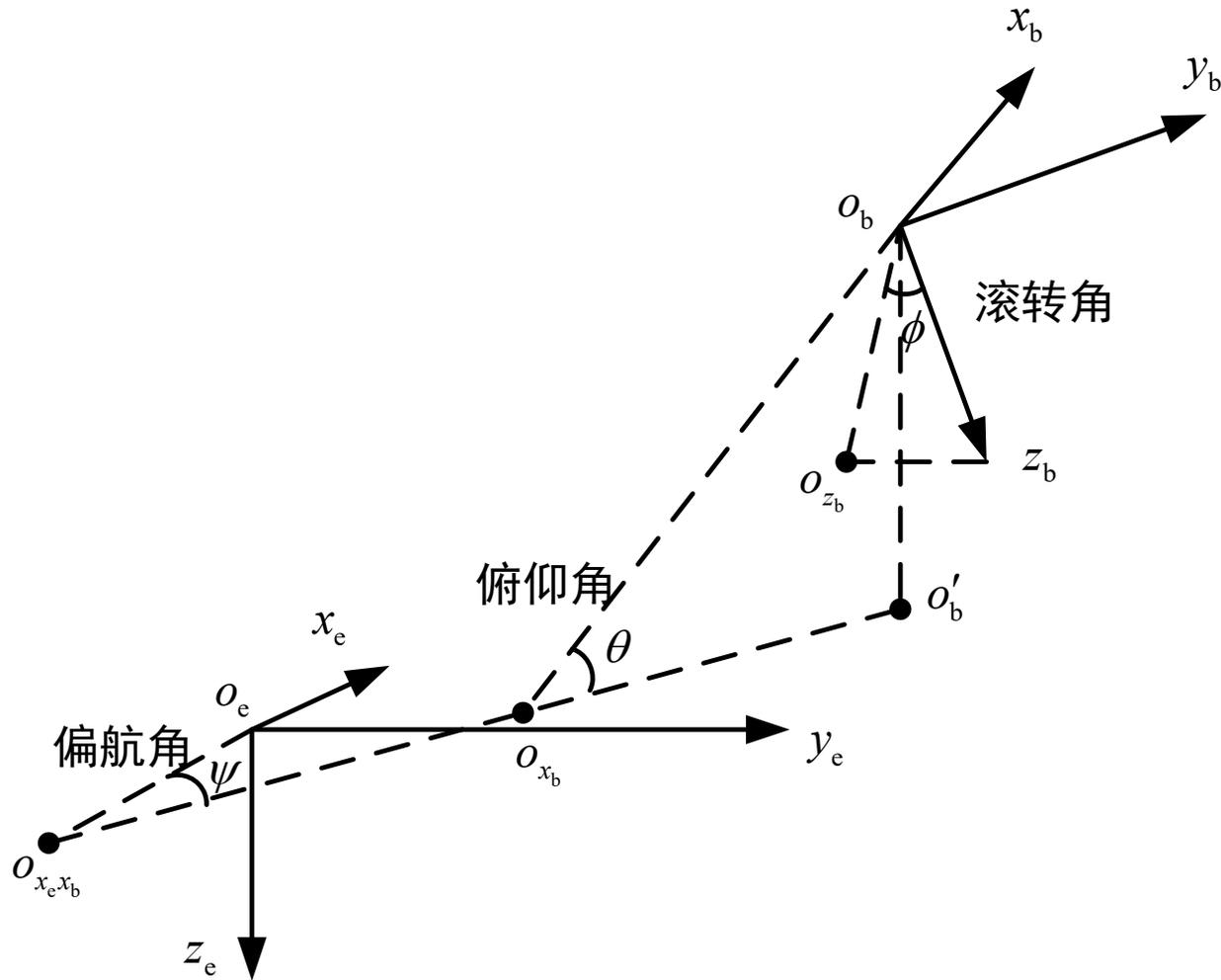


(c) 滚转角

偏航角、俯仰角与滚转角分步转动示意图

1. 坐标系和欧拉角

欧拉角



欧拉角表示示意图

- 左图表示**正**的俯仰角 θ ;
- 左图表示**负**的滚转角 ϕ ;
- 左图表示**正**的偏航角 ψ 。

2. 布局设计

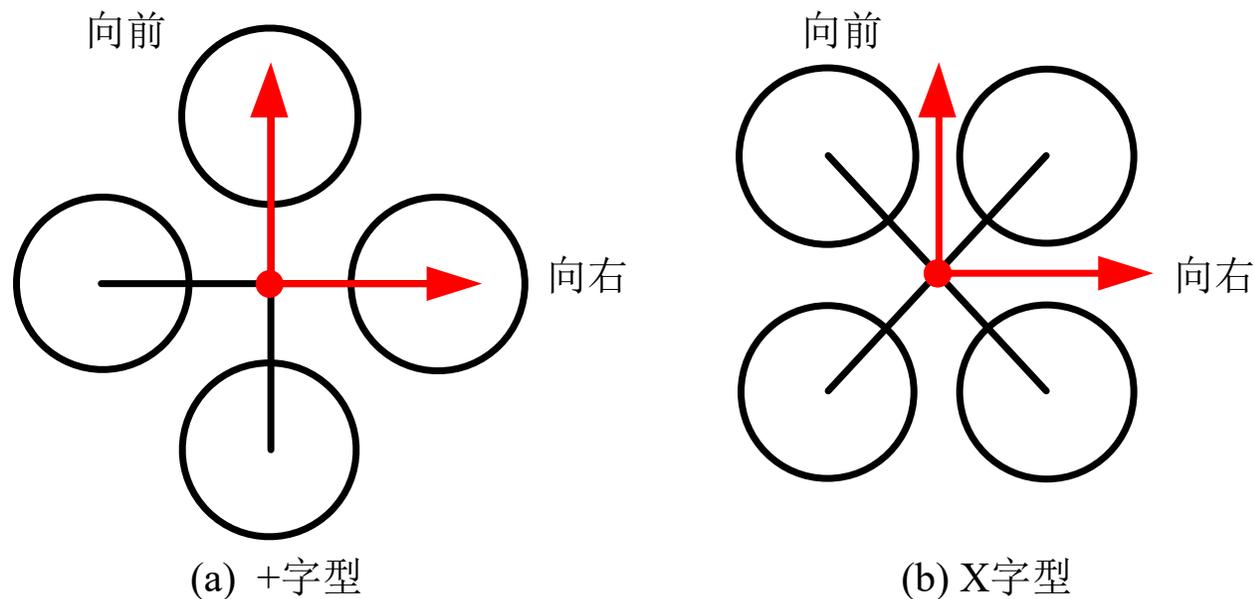
机架布局



(1) 机身布局：交叉型

按飞行方向与机身关系又分为十字型和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。



传统四旋翼的结构形式

2. 布局设计

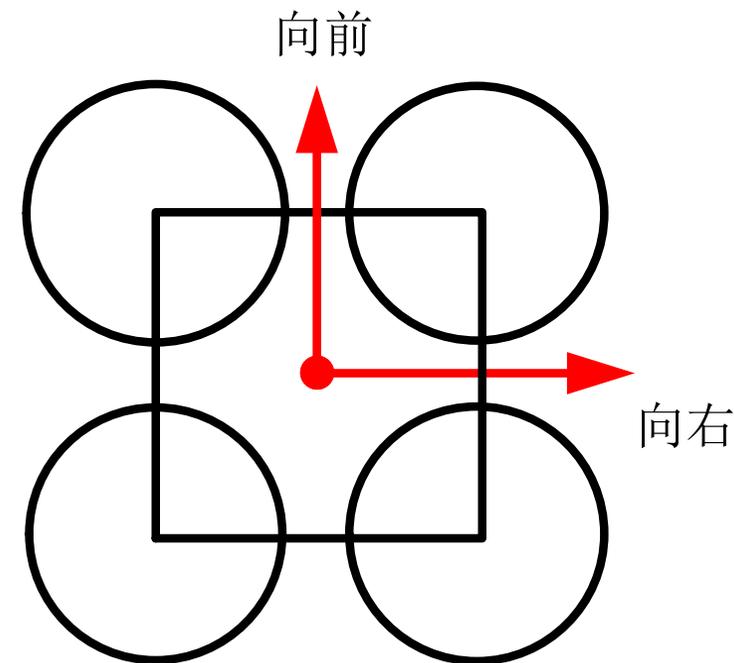
机架布局



(1) 机身布局：环形

- 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。

应注意，对于一般的常见布局，在多旋翼飞行过程中，**沿飞行方向来看**前方旋翼旋转导致的气流流动会对后方旋翼的气流环境产生**一定的负面影响**。



环形四旋翼的结构形式

2. 布局设计

机架布局

(2) 旋翼安装:

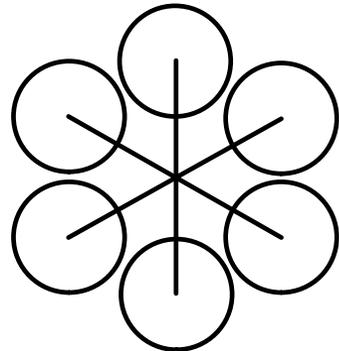
常规和共轴双桨

① 共轴双桨优点

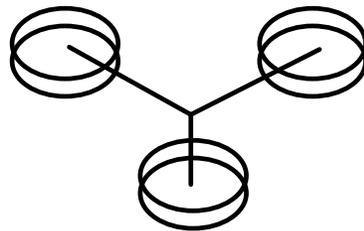
- 不增加多旋翼整体尺寸
- 减少螺旋桨对相机视场的遮挡

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 $h/r_p > 0.357$

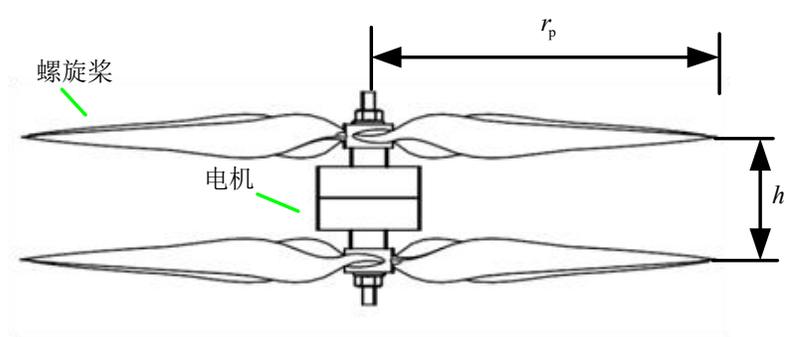


(a) 常规形式



(b) 共轴双桨形式

一轴一桨和一轴双桨示意图



共轴双桨的简单连接示意图

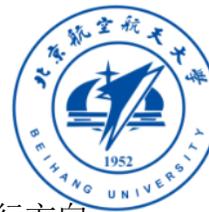


Ehang (亿航) 184飞行器

[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.

2. 布局设计

机架布局



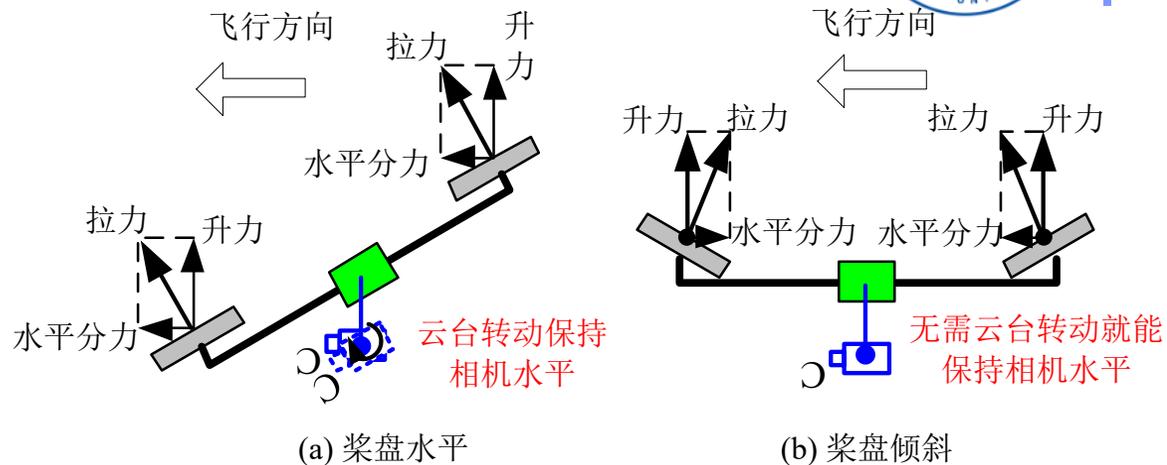
(2) 旋翼安装：桨盘角度

① 螺旋桨桨盘水平装配

- 简单
- 需云台使得相机保持水平

② 螺旋桨桨盘倾斜装配

- 至少六个桨
- 无需云台



桨盘水平和桨盘倾斜多旋翼的前飞方式



桨盘倾斜多旋翼CyPhyLVL1



2. 布局设计

机架布局



(2) 旋翼安装：电机安装方式



极飞XMission



大疆Phantom



深圳零度Xplorer



亿航Ghost



经纬 M300 RTK

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：

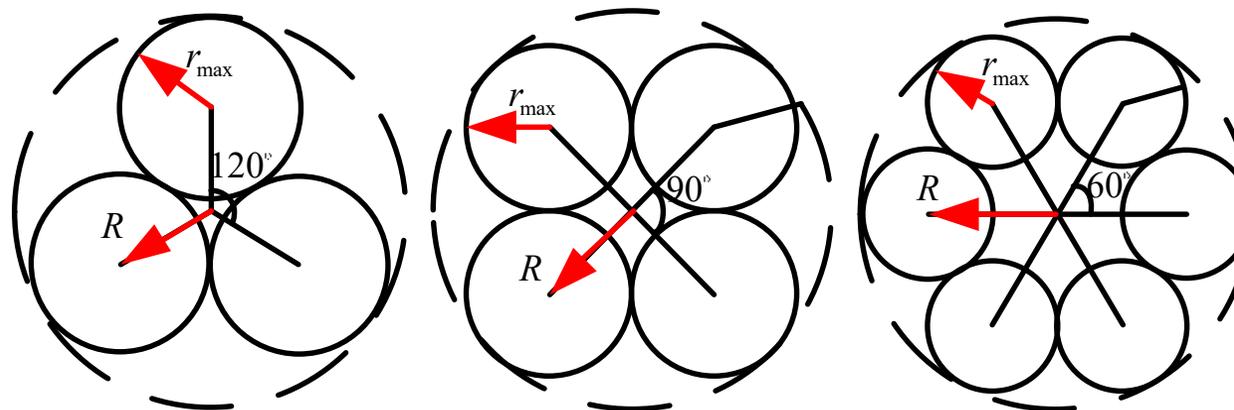
- 1) 螺旋桨产生推力
- 2) 下洗气流完整，防雨，气流低于飞控气压计高度准确，不脱桨

2. 布局设计

机架布局



(3) 旋翼与机架半径



多旋翼机体半径与最大旋翼半径示意图

n_r 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）

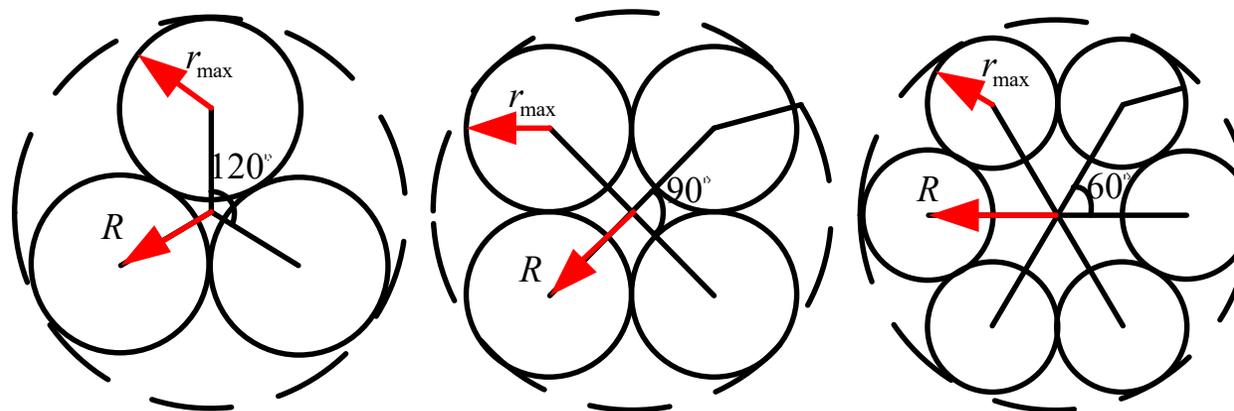
$$R = \frac{r_{\max}}{\sin \frac{\theta}{2}} = \frac{r_{\max}}{\sin \frac{180^\circ}{n_r}}$$

2. 布局设计

机架布局



(3) 旋翼与机架半径



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.

2. 布局设计

机架布局



(4) 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

Freefly多旋翼的两种相机安装方式

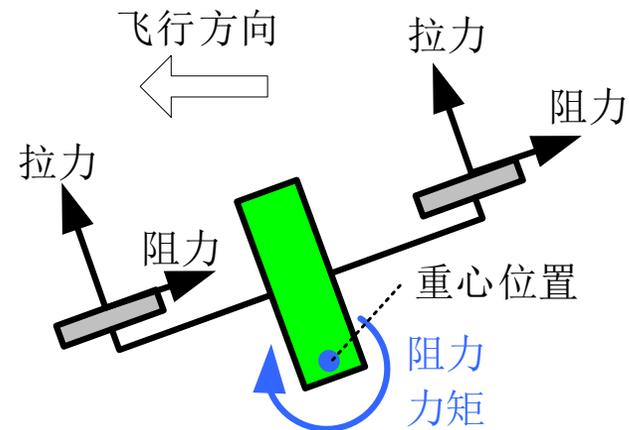
2. 布局设计

机架布局

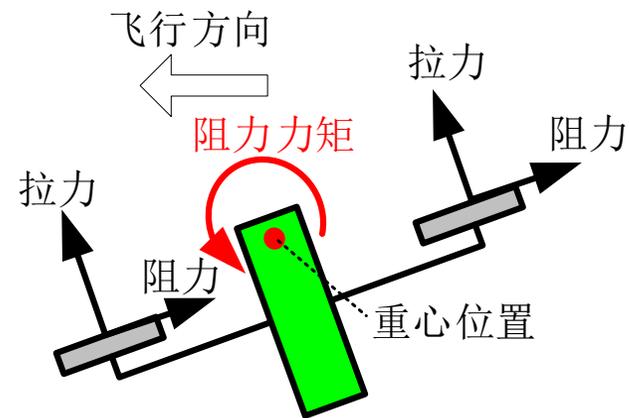
(4) 重心位置

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) 前飞时重心偏低



(b) 前飞时重心偏高

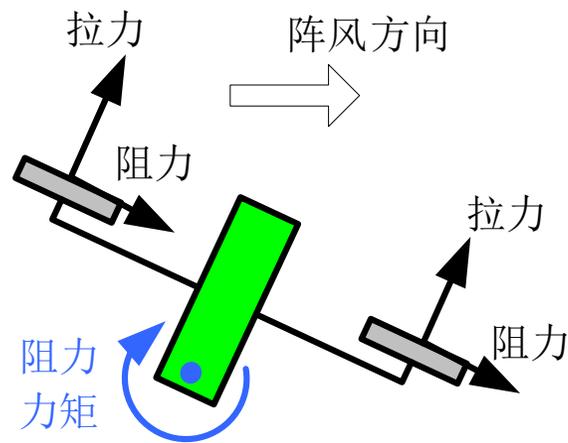
2. 布局设计

机架布局

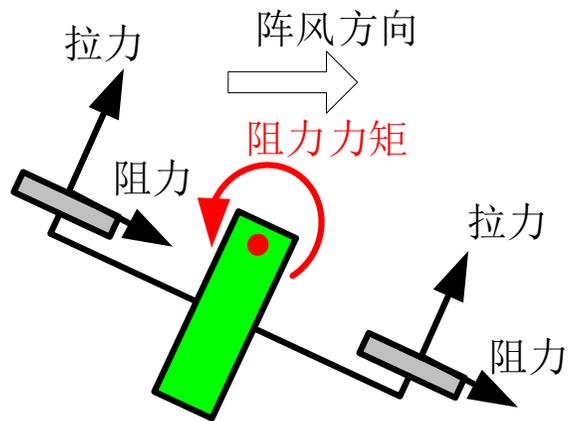
(4) 重心位置

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。**



(c) 有风干扰时重心偏低



(d) 有风干扰时重心偏高

2. 布局设计

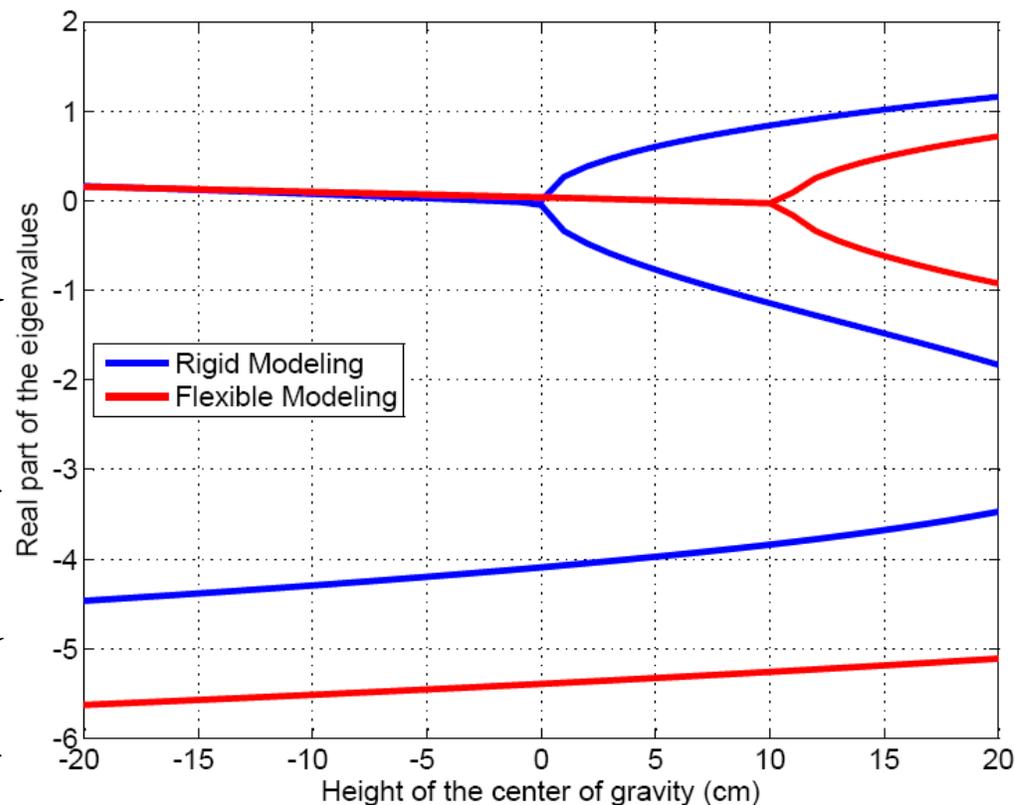
机架布局



(4) 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式很不稳定。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。更具体的内容可参考文献[3]。



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

2. 布局设计

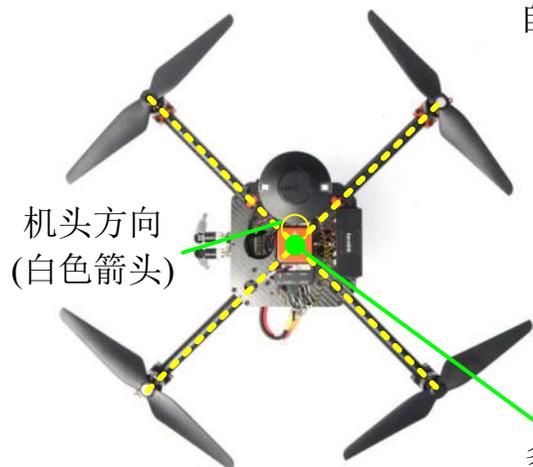
机架布局



(5) 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



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。

2. 布局设计

气动布局

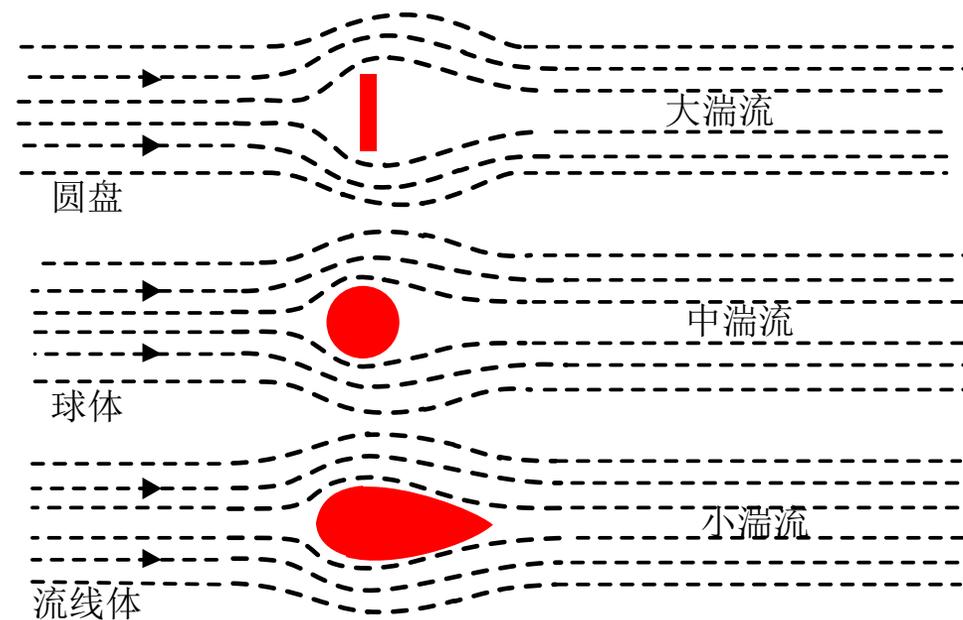
对外形进行设计主要是为了降低飞行时的阻力。按其产生的原因不同可分为

(1) 摩擦阻力

(2) 压差阻力

(3) 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。

(4) 诱导阻力



压差阻力示意图

2. 布局设计

气动设计

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) Microdrones MD4-3000



(c) DHL Parcelcopter



(d) 北航可靠飞行控制课题组
升力翼多旋翼

具有一定外形设计的多旋翼

A Lifting Wing Fixed on Multirotor UAVs for Long Flight Ranges

Kun Xiao, Yao Meng, Xunhua Dai, Haotian Zhang, Quan Quan



rfly.buaa.edu.cn

3. 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。

3. 结构设计

减振考虑



(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。
- ③ **减少能源消耗**。

3. 结构设计

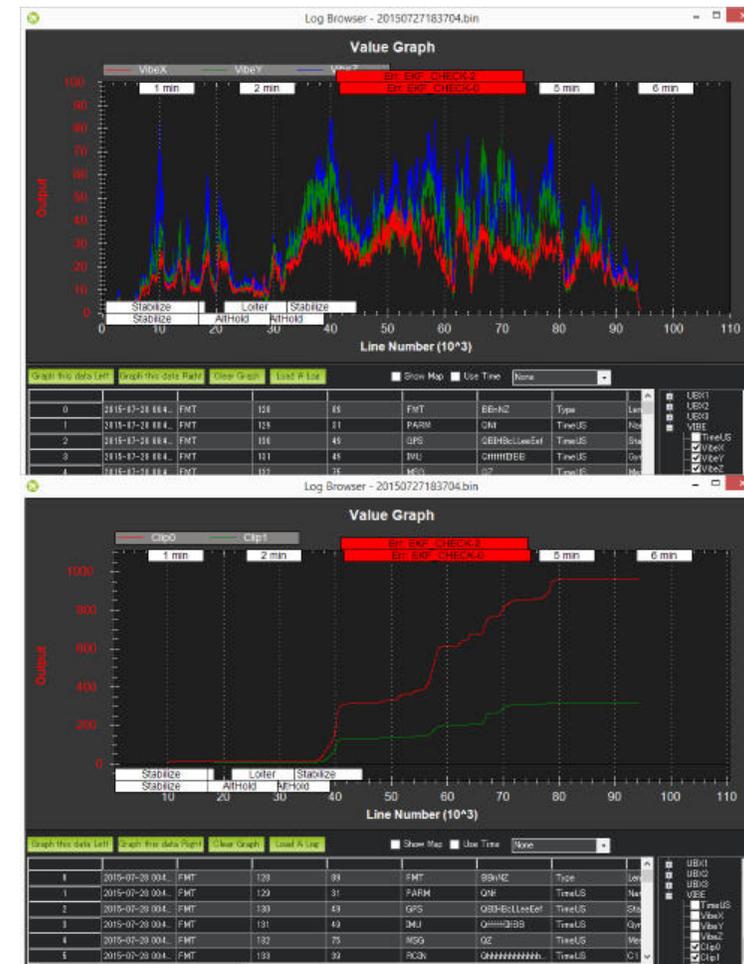
减振考虑



(2) 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



噪声大时的位置估计，来源网站 ardupilot.org

3. 结构设计

减振考虑

(3) 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。



(a) 收起状态



(b) 展开状态

Nixie可穿戴四旋翼概念机



Nixie折叠和抛飞视频

3. 结构设计

减振考虑



(3) 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。

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。

3. 结构设计

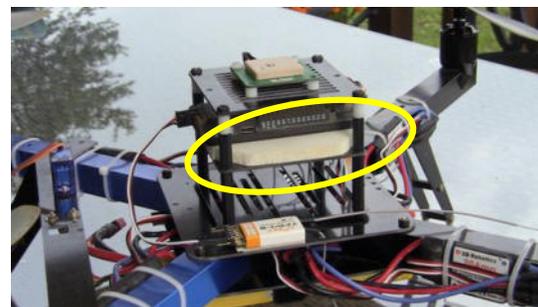
减振考虑

(4) 自驾仪与机架的减振

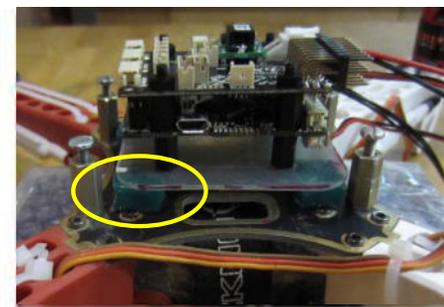
- ① 传统做法上，双面泡沫胶带和尼龙扣已被应用于把自驾仪固定在机架上。
- ② 在许多情况下，因为自驾仪质量很小，导致泡沫胶带或尼龙扣不能起到足够的减振作用。如右图，已被测试过的可行的隔振方案有：

Dubro泡沫、凝胶垫、O形环悬挂安装和耳塞式安装等。

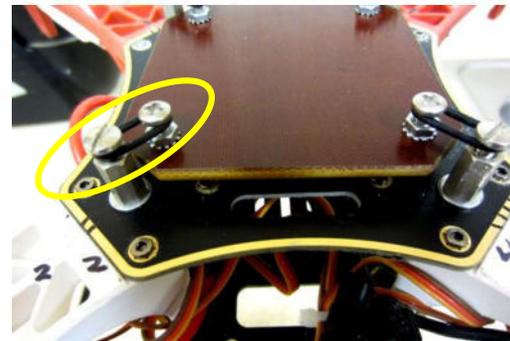
- ③ 目前市面上也有飞控减振器。它由**2块玻纤支架，4个减震球和2块泡棉胶垫**组成。



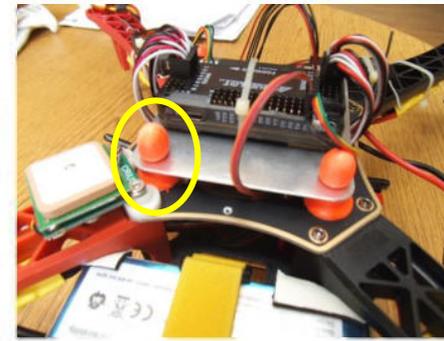
(a) 泡沫



(b) 凝胶垫



(c) O型环



(d) 耳塞式

隔振方案,来源 ardupilot.org

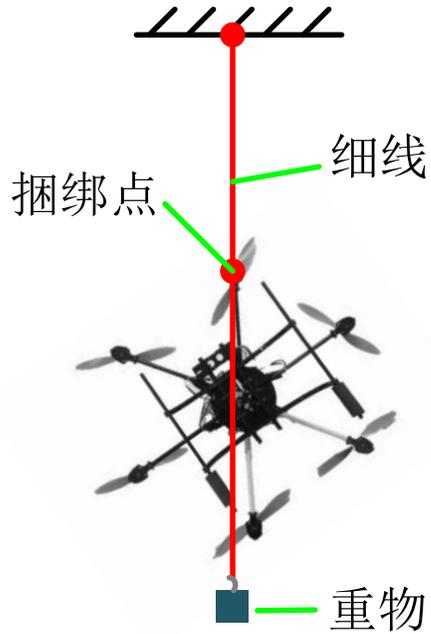


减振器

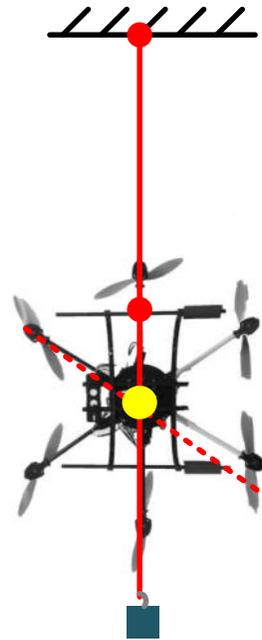
4. 重心和转动惯量测试



重心测试



(a) 第一次悬挂



(b) 第二次悬挂

多旋翼重心的确定方式

步骤如下：

(1) 取一根细绳，末端绑上重物，将多旋翼某机臂的一头绑在细绳中间，然后提起细绳的另一头。记录悬线在多旋翼上的位置（图(a)中实线，(b)中虚线所示）。

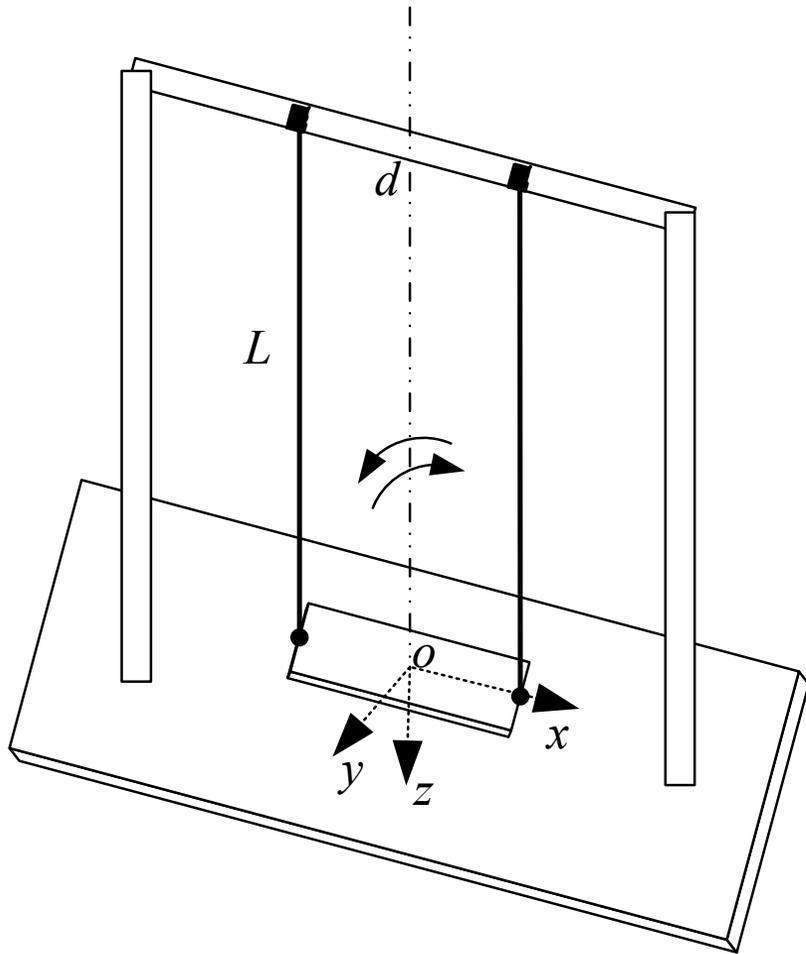
(2) 同样的，将接触点放在另一个地方，提起多旋翼并记录悬线位置。

(3) 如图(b)所示，取两次记录悬线的交点位置就是多旋翼质心所在位置。

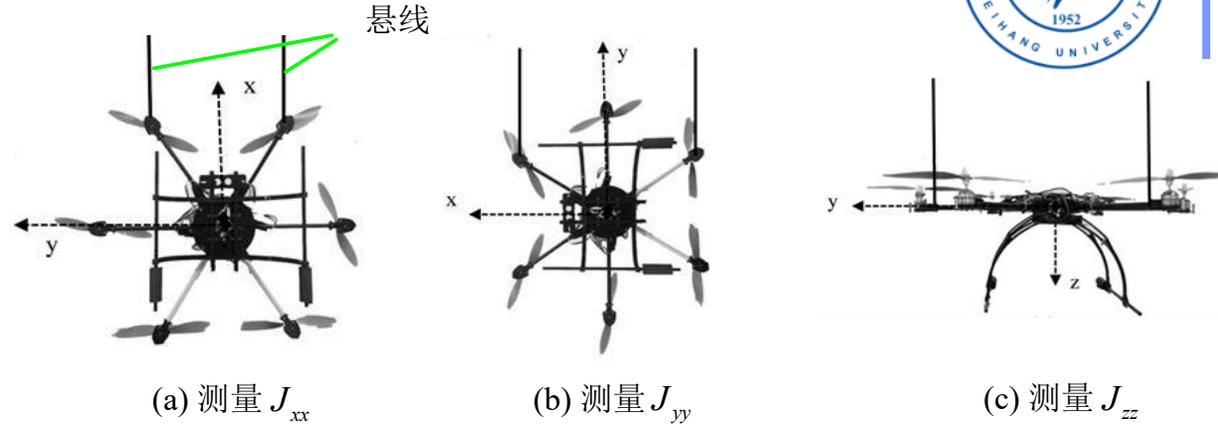
(4) 通过多次同样的测量，可提高质心测量精度。

4. 重心和转动惯量测试

转动惯量测试



双线摆测量转动惯量示意图



多旋翼主轴转动惯量测量

原理：以z轴为例，双线摆动的周期满足下列公式

从而有

$$T_0 = 4\pi \sqrt{\frac{J_{zz}L}{m_0gd^2}}$$

问题：惯性积 J_{xy}, J_{yz}, J_{xz} 如何求？

步骤详情见“全权，戴训华等，一种测量小型飞行器转动惯量与惯性积的方法.发明专利，授权号ZL 201310479270.0”。

5. 本讲实践



课堂实践：欧拉角实验

(1) 实践目标

- 准备
 - 硬件：Windows 系统的计算机（至少需要一个 USB 接口）一台，自驾仪一块、数据线一套。
 - 软件：地面站软件 Mission Planner。
- 目标
 - 练习使用 Mission Planner 软件，掌握通过软件观测自驾仪欧拉角的方法。
 - 观察自驾仪转动时欧拉角的变化，掌握欧拉角的物理含义。

5. 本讲实践



课堂实践：欧拉角实验

(2) 实践步骤

- ① 正确连接 Mission Planner 地面站软件与自驾仪
- ② 将自驾仪放置在水平桌面上，即在俯仰角和滚转角为0的情况下，逐步绕 $o_b z_b$ 轴旋转自驾仪，观察偏航角的变化
- ③ 然后同理，将自驾仪重新放置在水平桌面上，绕自驾仪 $o_b y_b$ 轴旋转观察俯仰角变化情况，或绕 $o_b x_b$ 轴旋转观察滚转角变化情况
- ④ 进行一次连续的旋转操作。第一步将自驾仪绕 $o_b z_b$ 轴旋转使偏航角到某一任意角度；第二步将自驾仪绕 $o_b x_b$ 轴旋转使滚转角至 30° 左右；随后将自驾仪绕 $o_b y_b$ 轴进行旋转，使俯仰角变大。

5. 本讲实践

课堂实践：欧拉角实验



欧拉角实验视频插入

5. 本讲实践



课堂实践：转动惯量测试实验

(1) 实践目标

- 准备
 - 硬件：固定支架一套、悬线一卷、多旋翼一架、计时秒表一块（可用手机中的秒表功能）。
- 目标
 - 利用双摆线法，熟练掌握中心主转动惯量的测量。

(2) 实践原理

- 3.4.2节双摆线实验测量中心主转动惯量的方法。
- 假设实验用多旋翼质量分布均匀，忽略惯性积。

5. 本讲实践



课堂实践：转动惯量测试实验

(3) 实践步骤

- ① 步骤一：根据几何对称性，用手和眼感知重量分布可粗略确认重心位置。
- ② 步骤二：将两根细绳固定在多旋翼机体上，调整两接触点的位置保证两点等高，且均匀分布在重心两侧。通过改变捆绑点的位置，可以测量不同轴对应的转动惯量。
- ③ 步骤三：将细绳的上端捆绑在水平放置的硬杆上，保证两细绳的长度完全相同，此时两细绳会围成一个矩形，此时记下矩形的宽 d 与长 L 。
- ④ 步骤四：调整接触点的位置，来保持更好的平衡。
- ⑤ 步骤五：将多旋翼绕悬挂轴旋转一个小角度，记录摆动 50 个周期的时间 T ，进而可得双线摆的周期为 $T_0 = T/50$ 。初始摆角不宜太大，将摆角控制在 10° 以内，即可获得较高的精度。
- ⑥ 步骤六：将 T_0 代入公式计算 J_{xx} 。改变悬挂方式，重复操作可以得到 J_{yy} 和 J_{zz} 。

5. 本讲实践

课堂实践：转动惯量测试实验



转动惯量实验视频插入

6. 本讲小结



(1) 欧拉角是一种较为常用的飞行器姿态表示方法，具有直观、简单明了的特点，在此基础上建立机体和地面坐标系，使用坐标表示飞行器姿态和位置，为飞行器控制建立理论基础。

(2) 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。

(3) 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。

这一章中，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。



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

