



多旋翼飞行器设计与控制

第二讲 多旋翼基本组成

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17日 北航主南401



前言

东方智慧：中国古人很早就认识到整体和局部之间相互依存的关系。《黄帝内经》分《灵枢》、《素问》两部分，是中国最早的医学典籍，传统医学四大经典著作之一。《黄帝内经》把人体看作是由各种器官有机地联系在一起的整体，主张从整体上研究人体的病因。苏轼在《琴诗》中写道：“若言琴上有琴声，放在匣中何不鸣？若言声在指头上，何不于君指上听？”该诗描述的是：在乐曲、琴声中指头、琴、演奏者的思想感情、演奏技巧等部分，要素是相互依存、缺一不可的，它们之间是相互影响、相互制约的关系，存在着紧密的联系。



来源于<https://www.douban.com>



前言

多旋翼的基本组成是什么，它们又有何作用？



大纲

1. 总体介绍

2. 机身主体

3. 动力系统

4. 控制系统

5. 小结

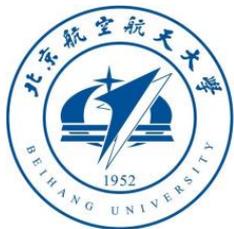
6. 作业



1. 总体介绍



多旋翼系统实物图，图片主体来源于网站<http://ardupilot.com/>



2. 机身主体

□ 机架

(1) 作用

多旋翼的承载平台，所有设备都是用机架承载。因此，多旋翼的机架的好坏，很大程度上决定了这架多旋翼是否好用。衡量一个机架的好坏，可以从耐用性和安全性、使用方便程度、元器件安装是否合理等等方面考察。



大疆风火轮F450



大疆风火轮 F550



零度HIGHONE四旋翼
(机架可折叠)



极飞X650 v4 Frame
(机架可折叠)



2. 机身主体

□ 机架

(2) 指标参数

1) 重量

2) 轴距 (Diagonal Size)

轴距是指对角线两个螺旋桨中心的距离，单位通常是毫米 (mm)，用于表达机架的尺寸大小。比如：大疆风火轮**F450**，轴距**450mm**；大疆风火轮**F550**轴距**550mm**。

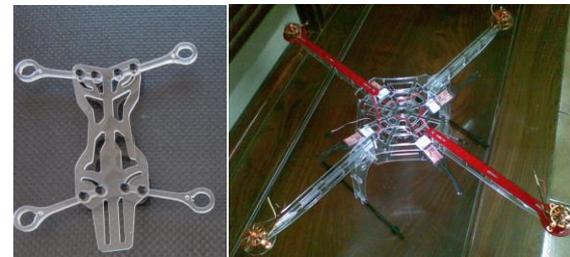
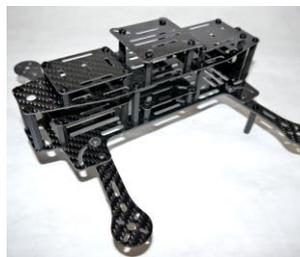


图. 轴距示意图



2. 机身主体

□ 机架



3) 材料 (参考<http://aeroquad.com/showwiki.php?title=Frame-Materials>)

	碳纤维	玻璃钢	聚碳酸酯	丙烯酸塑料	铝合金	轻木
密度 (lb/cuin)	0.05	0.07	0.05	0.04	0.1	0.0027-0.0081
刚度 (Msi)	9.3	2.7	0.75	0.38	10.3	0.16-0.9
强度 (Ksi)	120	15-50	8-16	8-11	15-75	1-4.6
价钱 (越大越优)	1	6	9	9	7	10
加工 (越大越优)	3	7	6	7	7	10

注:

(a) 刚度。弹性模量表示是材料在弹性变形阶段, 其应力和应变成正比例关系; 形变越难改变, 刚度越大

(b) 强度。抗拉强度就是试样拉断前承受的最大标称拉应力



2. 机身主体

□ 起落架 (Landing Gear)

作用:

- 1) 支撑多旋翼重力
- 2) 避免螺旋桨离地太近, 而发生触碰
- 3) 减弱起飞时的地效
- 4) 消耗和吸收多旋翼在着陆时的撞击能量



图. 亿航 Ghost





2. 机身主体

□ 涵道

(1) 作用

- 1) 保护桨叶和人身安全
- 2) 提高升力效率
- 3) 减少噪音

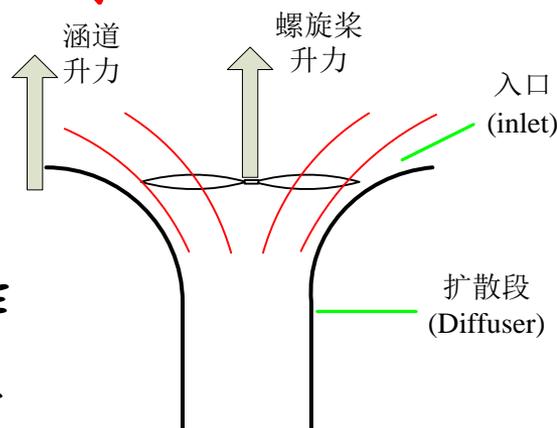
(2) 工作原理

工作原理为：当螺旋桨工作时，进风口内壁空气速度快静压小，而进风口外壁静压大，因此涵道能产生附加升力。

在一个流体系统，流速越快，流体产生的压力就越小，这就是被称为“流体力学之父”的丹尼尔·伯努利1738年发现的“伯努利定理”。



图片来源<http://news.mx3g.com/yaokongfeiji/200806/19-207.html>



(a) 涵道工作原理



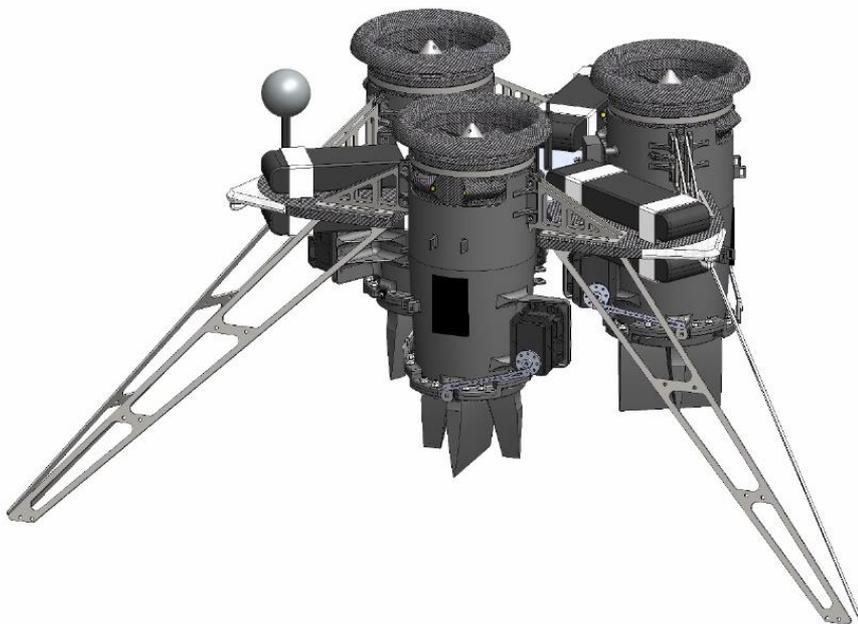
(b) 涵道四旋翼实物

图. 涵道原理和实物



2. 机身主体

□ 涵道



T-Hawk/g MAV



Fleye

Flying platform (<https://www.youtube.com/watch?v=NYY9q-vs4Nw>)



2. 机身主体

□ 涵道

(3) 参数

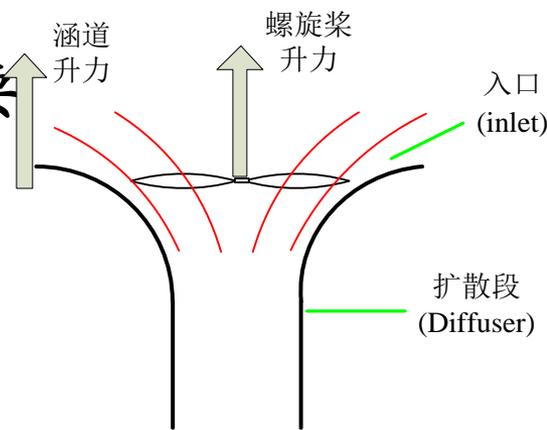
1) 重量

2) 升力效率。实际上涵道需要

优化设计，包括扩散段长度与螺旋桨的半径比例等。设计和

优化方法可参见[1]

实际中涵道能提升升力效率同时，因为其自身的重量也会降低悬停时间。因此，最终的优化设计需要进行综合考虑。



(a) 涵道工作原理



(b) 涵道四旋翼实物

[1] Hrishikeshavan V, Black J, Chopra I. Design and performance of a quad-shrouded rotor micro air vehicle. *Journal of Aircraft*, 2014, 51(3): 779-791.



2. 机身主体

□ 云台 (Camera Stabilizer or Camera Gimbal)

(1) 作用

- 1) 支撑多旋翼重力多旋翼在飞行中产生倾斜时，云台能平稳转动使照相机光轴变化平缓，有利于视频输出平滑及目标检测
- 2) 减少了多旋翼在飞行过程中因外部因素导致的相机抖动





2. 机身主体

□ 云台 (Camera Stabilizer or Camera Gimbal)



云台效果视频Quadcopter with stabilized GoPro gimbal (<https://www.youtube.com/watch?v=ybTNjt8sMnA>)



2. 机身主体

□ 云台 (Camera Stabilizer or Camera Gimbal)

(2) 工作原理

通过角度传感器测量角度，进一步姿态是由两台执行电动机来实现，电动机接受来自控制器的信号精确地运行定位。

(3) 指标参数

- 1) 重量
- 2) 负载重量
- 3) 角度控制精度

目前的云台的控制精度都能在 $\pm 0.02^\circ$

- 4) 最大可控转速
- 5) 可控转动范围

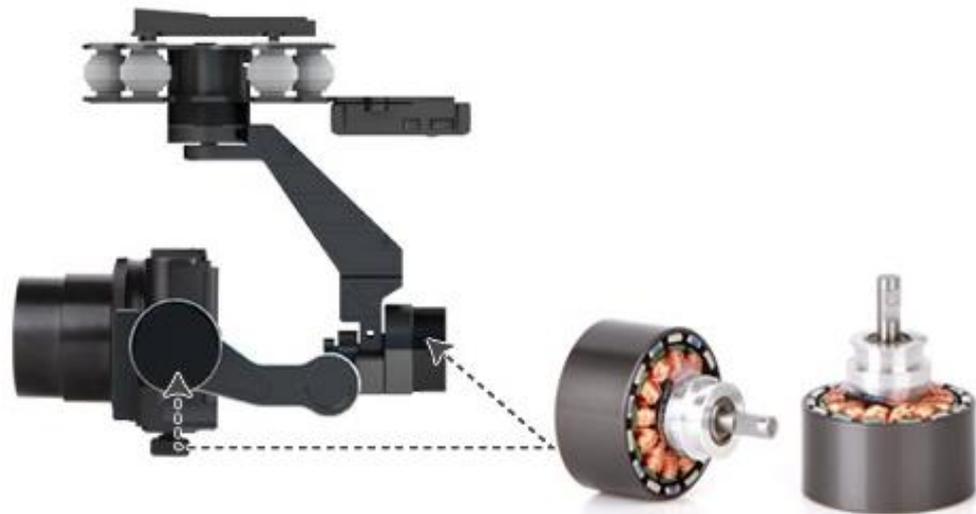
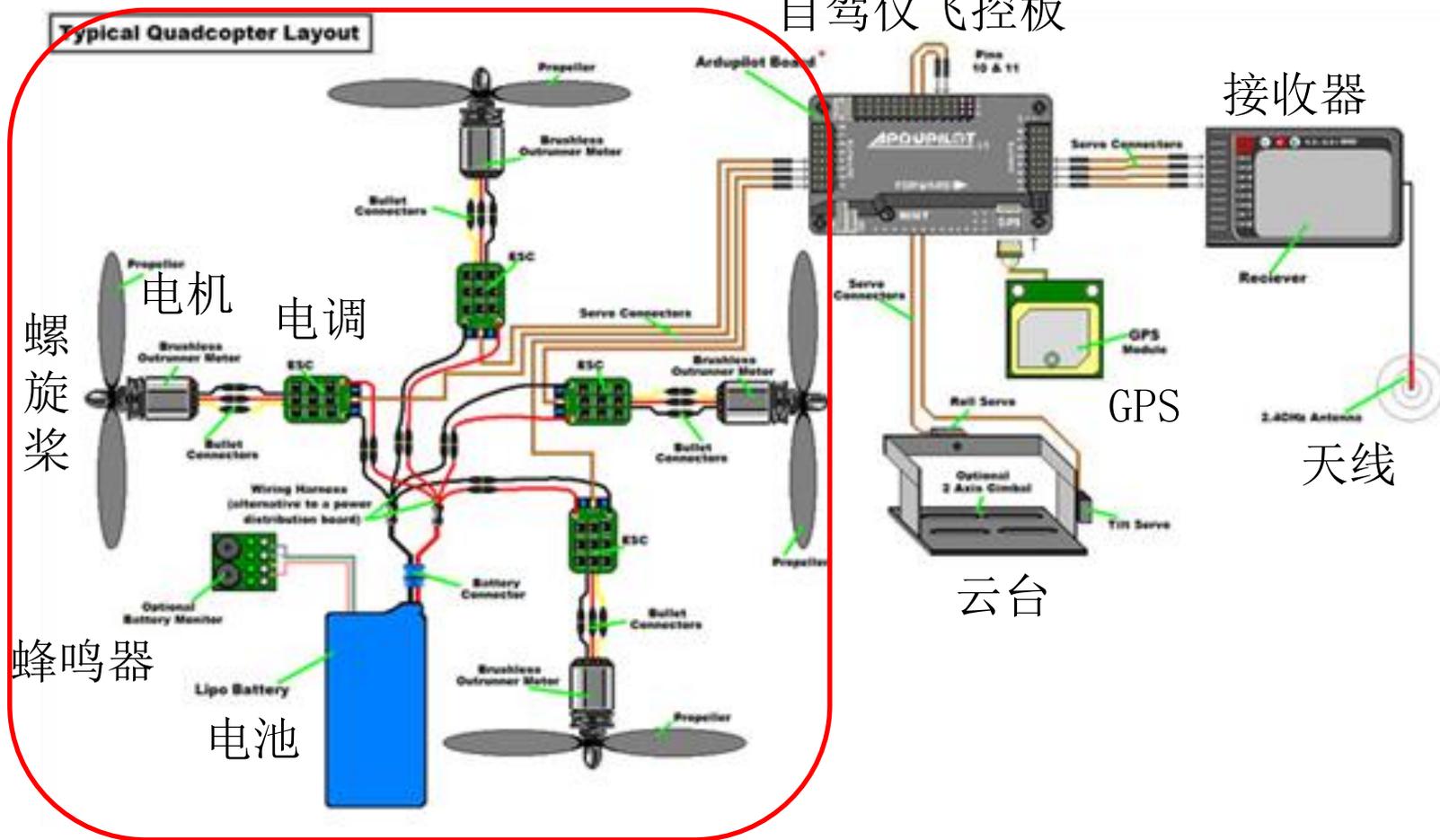


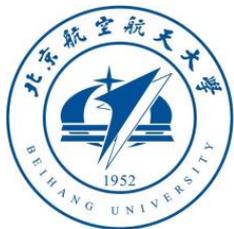
图. 云台工作原理图



自驾仪飞控板



多旋翼内部布局，图片主体来源于网站 <http://ardupilot.com/>



3. 动力系统

□ 螺旋桨

(1) 作用

1) 螺旋桨是直接产生推力的部件，同样是以追求效率为第一目的。

2) 匹配的电机、电调和螺旋桨搭配，可以在相同的推力下耗用更少的电量，这样就能延长多旋翼的续航时间。因此，选择最优的螺旋桨是提高续航时间的一条捷径。



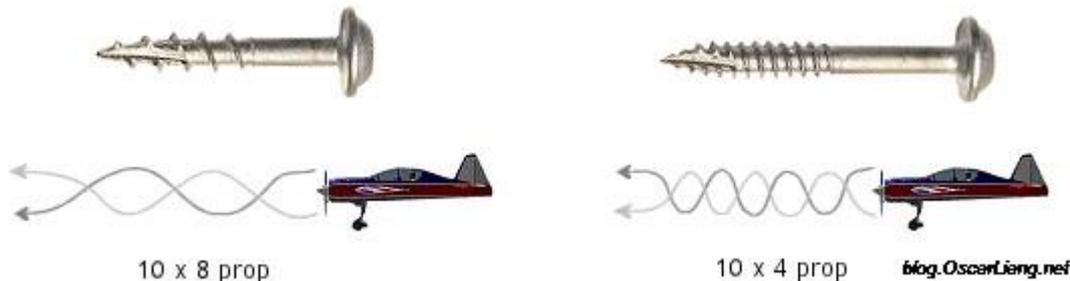


3. 动力系统

□ 螺旋桨

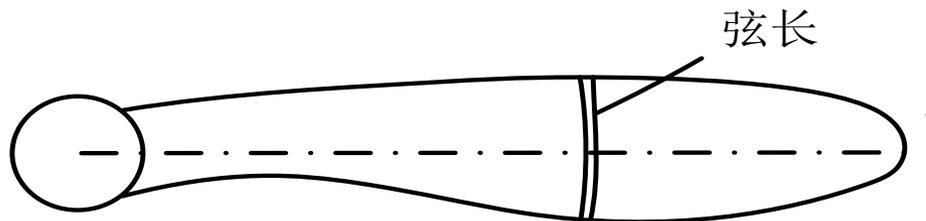
(2) 指标参数

1) 型号



假设螺旋桨在一种不能流动的介质中旋转，那么螺旋桨每转一圈，就会向前进一个距离，就称为螺距（Propeller Pitch）。显然，桨叶的角度越大，螺距也越大，角度与旋转平面角度为0，螺距也为0。螺旋桨一般用4个数字表示，其中前面2位是螺旋桨的直径，后面2位是螺旋桨的螺距。比如：1045桨的直径为10英寸，而螺距为4.5英寸。

2) 弦长





3. 动力系统

□ 螺旋桨



(a) 2叶桨



(b) 3叶桨

图. 螺旋桨实物图

3) 转动惯量

转动惯量越小，控制起来更灵敏。更重要的是，螺旋桨的转动惯量越小，改变转速所消耗的能量就越小，因此能提高飞行效率。因此，为了减少转动惯量，在不改变外形和强度的前提下，有些特制的螺旋桨内部材质还会进一步设计。

4) 桨叶数

有实验表明[2,p.65]，对于多旋翼，2叶桨的性能最优。

[2]Aaron M Harrington. Optimal propulsion system design for a micro quad rotor [Master dissertation]. University of Maryland, USA, 2011.



3. 动力系统

□ 螺旋桨

5) 安全转速

安全转速的计算，要保证在所有可能工况下不超过最高允许转速。比如：APC网站[3]上给出他们提供的多旋翼桨（Multi-Rotor (MR) Propellers）的最大桨速（rpm，revolutions per minute，转/分钟）是 $105000/\text{prop diameter (inches)}$ 。以最常用的10寸桨为例，多旋翼桨最大桨速为10500rpm。慢飞桨（Slow Flyer (SF) Propellers）最大桨速只有 $65000/\text{prop diameter (inches)}$ 。因此，选择螺旋桨要注意使用场合。

[3] <http://www.apcprop.com/Articles.asp?ID=255>



3. 动力系统

□ 螺旋桨

6) 材料

一般有碳纤维、塑料、木制等材料。碳纤维桨比塑料桨贵几乎2倍。以下是碳纤维桨的优势[4]:

- 碳纤维桨刚性较好，因此产生振动和噪音较少
- 较塑料桨，更轻，强度更大
- 适用于高KV值电机，控制响应比较迅速。然而，当发生坠机时，因为碳纤维桨刚性强，电机将吸收大部分的冲击力。木桨一般更重，也更贵，比较适用于较大载重的多旋翼。

[4] <http://blog.oscarliang.net/carbon-fibre-props-plastic-propeller/>



3. 动力系统

□ 螺旋桨

(3) 静平衡和动平衡

- 进行静平衡和动平衡的目的是减少振动
- 螺旋桨静平衡是指螺旋桨重心与轴心线重合时的平衡状态；而螺旋桨动平衡是指螺旋桨重心与其惯性中心重合时的平衡状态
- 出现不平衡的情况时，可以通过贴透明胶带到轻的桨叶，或用砂纸打磨偏重的螺旋桨平面（非边缘）来实现平衡。



图. 图像质量变差，jello-like(果冻), wavy (波纹), warped (弯曲)



螺旋桨平衡器（用于静平衡）



3. 动力系统

□ 螺旋桨



简易的动平衡器测量方法[http://flitetest.com/articles/Laser_Balancing_Props]

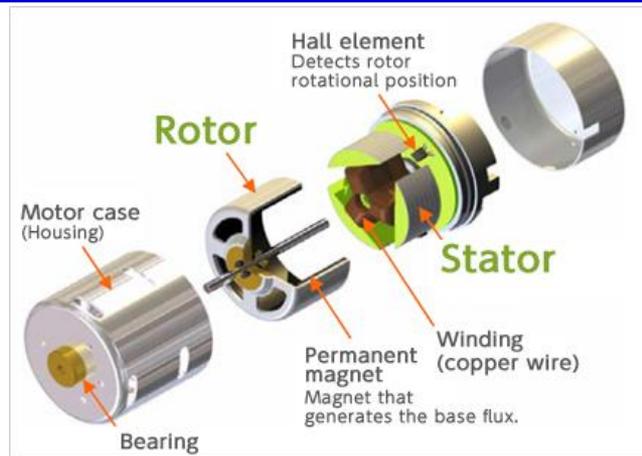


3. 动力系统

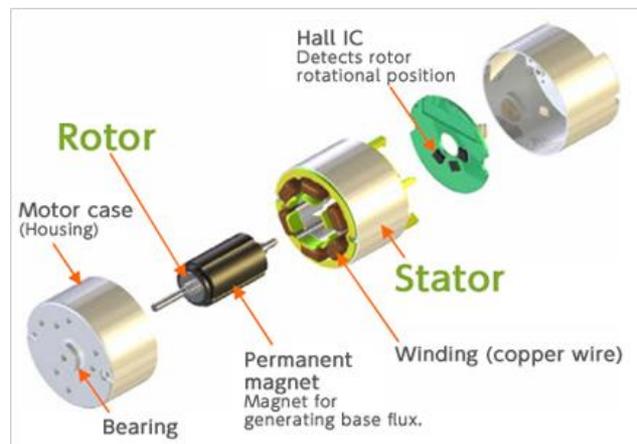
□ 电机

(1) 作用

多旋翼的电机主要以无刷直流电机为主，将电能转换成机械能。无刷直流电机运转时靠电子电路换向，这样就极大减少了电火花对遥控无线电设备的干扰，也减小了噪音。它一头固定在机架力臂的电机座，一头固定螺旋桨，通过旋转产生向下的推力。不同大小、负载的机架，需要配合不同规格、功率的电机。



外转子(Outer rotor) 电机



内转子(Inner rotor)电机

图片来源<http://www.nidec.com/en-IN/technology/capability/brushless/>



3. 动力系统

□ 电机

(2) 工作原理



Brushless DC Motor, How it works ? <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac>



3. 动力

□ 电机

(3) 指标参数

1) 尺寸

一般用4个数字表示，其中前面2位是电机转子的直径，后面2位是电机转子的高度。简单地说，前面2位越大，电机越肥，后面2位越大，电机越高。又高又大的电机，功率就更大，适合做大四轴。比如：**2212**电机表示电机转子的直径是**22mm**，电机转子的高度是**12mm**。

2) 标称空载KV值

无刷电机KV值定义为“转速/伏特”，意思为输入电压增加1伏特，无刷电机**空转转速**增加的转速值。例如：**1000KV**电机，外加**1V**电压，电机空转时每分钟转**1000**转，外加**2V**电压，电机空转就**2000**转了。单从KV值，无法评价电机的好坏，因为不同KV值有适用不同尺寸的桨。

3660-1700KV



RS2205

2300KV





3. 动力系统

□ 电机

3) 标称空载电流和电压

在空载试验时，对电动机施加标称空载电压(通常为10V)，使其不带任何负载空转，定子三相绕组中通过的电流，称为标称空载电流

4) 最大瞬时电流/最大持续电流

电机能承受的最大瞬时通过的电流，电机能允许持续工作而不烧坏的最大连续电流

5) 内阻

电机电枢本身存在内阻，虽然该内阻很小，但是由于电机电流很大有时甚至可以达到几十安培，所以该小内阻不可忽略



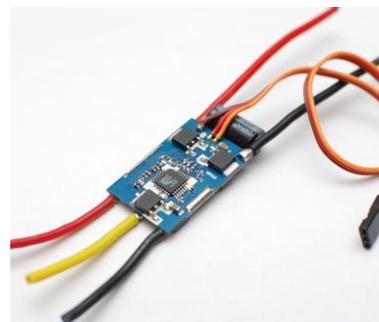
3. 动力系统

□ 电调

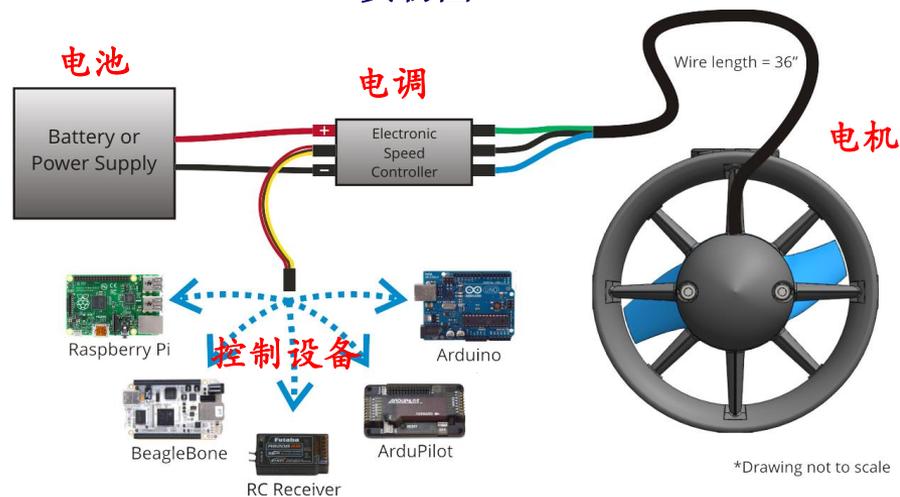
(1) 作用

电调全称电子调速器，英文 Electronic Speed Control，简称ESC。

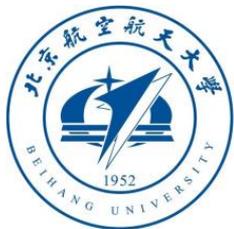
- 1) 电调最基本的功能就是电机调速（通过飞控板给定PWM信号进行调节）
- 2) 为遥控接收器上其它通道的舵机供电
- 3) 充当换相器的角色，因为无刷电机没有电刷进行换相（直流电源转化为三相电源供给无刷电机，并对无刷电机起调速作用），所以需要靠电调进行电子换相。
- 4) 电调还有一些其它辅助功能，如电池保护，启动保护、刹车等。



实物图



图片来源<http://veevo.jumpseller.com/t200-thruster>



3. 动力

□ 电调

(2) 指标参数

1) 电流

- 无刷电调最主要的参数是电调的功率，通常以安数A来表示，如10A、20A、30A。不同电机需要配备不同安数的电调，安数不足会导致电调甚至电机烧毁。
- 更具体地，无刷电调有持续电流和X秒内瞬时电流两个重要参数，前者表示正常时的电流，而后者表示X秒内的容忍的最大电流。
- 选择电调型号的时候一定要注意电调最大电流的大小是否满足要求，是否留有足够的安全裕度容量，以避免电调上面的功率管烧坏。

PUSH18A, BEC2A/5V
DC: 5.6V-16.8V



SK-30A, BEC2A/5V
DC: 2-4 LiPo/5-12NIMh





3. 动力系统

□ 电调

2) 内阻

电调具有相应内阻，其发热功率需要得到注意。有些电调电流可以达到几十安培，发热功率是电流的平方的函数，所以电调的散热性能也十分重要，因此大规格电调内阻一般都比较小。

3) 刷新频率

电机的响应速度与电调的刷新速率有很大关系。在多旋翼开始发展之前，电调多为航模飞机而设计，航模飞机上的舵机由于结构复杂，工作频率最大为50Hz。相应地，电调的刷新速率也都为50Hz。多旋翼与其它类型飞机不同，不使用舵机，而是由电调直接驱动，其响应速度远超舵机。目前，具备UltraPWM功能的电调可支持高达500Hz的刷新率。



3. 动力系统

□ 电调

4) 可编程特性

通过内部参数设置，可以达到最佳的电调性能。通常有三种方式可对电调参数进行设置：

- 可以通过编程卡直接设置电调参数
 - 通过USB连接，用电脑软件设置电调参数
 - 通过接收器，用遥控器摇杆设置电调参数。
- 设置的参数包括：电池低压断电电压设定、电流限定设定、刹车模式设定、油门控制模式、切换时序设定、断电模式设定、起动方式设定以及PWM模式设定等等。



图.好盈无刷电调参数编程卡

Programmable Items	Value								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Basic Items									
1. Running Mode	Forward with Brake	Forward/Reverse with Brake	Forward/Reverse (For Rock Crawler)						
2. Drag Brake Force	0%	5%	10%	20%	40%	60%	80%	100%	
3. Low Voltage Cut-Off Threshold	No-Protection	2.6V /Cell	2.8V /Cell	3.0V /Cell	3.2V /Cell	3.4V /Cell			
4. Start Mode(Punch)	Level1	Level2	Level3	Level4	Level5	Level6	Level7	Level8	Level9
Advanced Items									
5. Max Brake Force	25%	50%	75%	100%	Disable				
6. Max Reverse Force	25%	50%	75%	100%					
7. Initial Brake Force	= Drag Brake Force	0%	20%	40%					
8. Neutral Range	6% (Narrow)	9% (Normal)	12% (Wide)						
9. Timing	0.00°	3.75°	7.50°	11.25°	15.00°	18.75°	22.50°	26.25°	
10. Over-heat Protection	Enable	Disable							
11. Motor Rotation	Counter Clockwise	Clockwise							
12. Lipo Cells	Auto Calculate	2 Cells	3 Cells	4 Cells	5 Cells	6 Cells			

图.一张电调参数配置表



3. 动力系统

□ 电调

5) 兼容性

如果电机和电调兼容性不好，那么会发生堵转，即电机不能转动了



关于不兼容视频Hobby King Red Brick ESC Turnigy 2200Kv motor trouble, <https://www.youtube.com/watch?v=zUCK7fTNwo0>



3. 动力系统

□ 电调

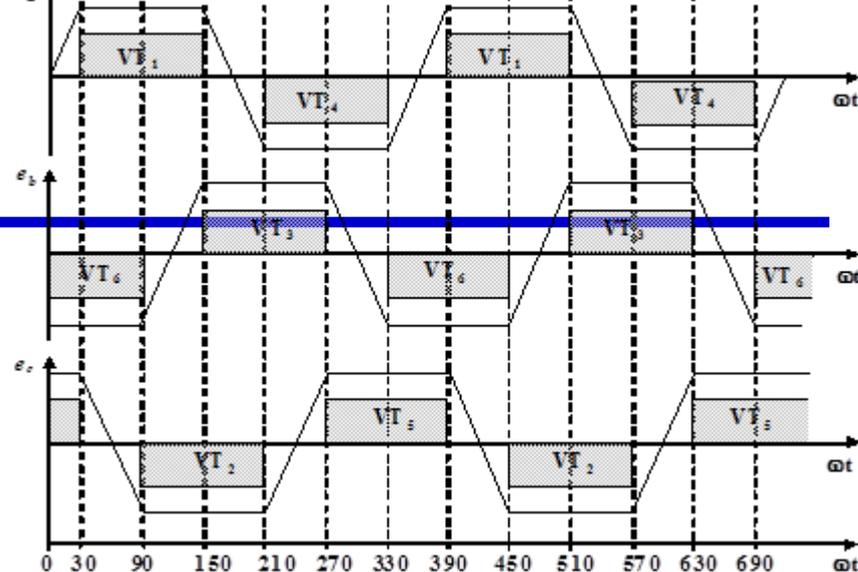
(3) 方波驱动 V.S. 正弦波驱动

1) 方波驱动

方波是数字信号，控制元件工作在开关状态，电路简单容易控制发热小等优点。数字电路容易控制，正弦波属于模拟信号，模拟信号控制相当复杂，而且控制元件工作在放大状态发热厉害。

2) 正弦波驱动是趋势（矢量控制，Field Oriented Control）

正弦波驱动在运行平衡性、调速范围和减少噪声振动等要好得多。目前正弦波驱动BLDCM多用于要求高的伺服系统,价格甚高。首先是光学编码器相当贵；其次驱动控制线路较复杂,所用的电流传感器及专用芯片等也较贵。





3. 动力系统

□ 电池

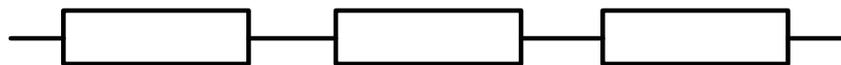
(1) 作用



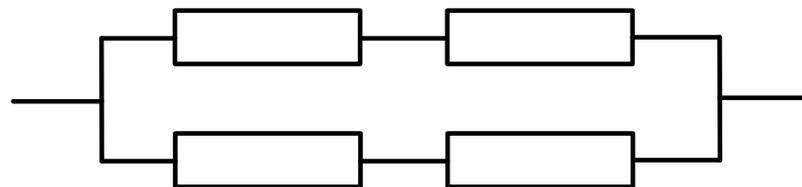
电池主要用于提供能量。目前航模最大的问题在于续航时间不够，其关键就在于电池容量的大小。现在可用来做模型动力的电池种类很多，常见的有锂电池（LiPo）和镍氢电池（NiMh），主要源于其优良的性能和便宜的价格优势。然而，对于多旋翼无人机而言，电池单位重量的能量载荷很大程度上限制了其飞行时间和任务拓展。



3. 动力系统



(a) 3S1P



(b) 2S2P

图. 电芯组合方式

□ 电池

(2) 指标参数

1) 电压

- 锂电池组包含两部分：电池和锂电池保护线路。
- 单节电压3.7V，3S1P表示3片锂聚合物电池的串联，电压是11.1V，其中：S是串联，P表示并联。又如2S2P电池表示2片锂聚合物电池的串联，然后两个这样的串联结构并联，总电压是7.4V，电流是单个电池的两倍。
- 不仅在放电过程中电压会下降，而且由于电池本身具有内阻，其放电电流越大，自身由于内阻导致的压降就越大，所以输出的电压就越小。

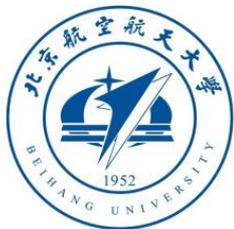


3. 动力系统

□ 电池

2) 容量

- 电池的容量是用毫安时表示的。5000毫安时的电池表示该电池以5000毫安的电流放电可以持续一小时。但是，随着放电过程的进行，电池的放电能力在下降，其**输出电压会缓慢下降**，所以导致其剩余容量与放电时间并非是线性关系。
- 在实际多旋翼飞行过程中，有两种方式检测电池的剩余容量是否满足飞行安全的要求。一种方式是**检测电池单节电压**，另一种方式是实时检测**电池输出电流**做积分计算。
- 注意：单电芯充满电电压为4.2V，放电完毕会降至3.0V(再低可能过放导致电池损坏)，一般无人机在3.6V时会电量报警



3. 动力系统

□ 电池

3) 放电倍率

一般充放电电流的大小常用充放电倍率来表示，即

$$\text{充放电倍率} = \text{充放电电流} / \text{额定容量}$$

例如：额定容量为100Ah的电池用20A放电时，其放电倍率为0.2C。电池放电倍率是表示放电快慢的一种量度。所用的容量1小时放电完毕，称为1C放电；5小时放电完毕，则称为1/5=0.2C放电。容量5000毫安时的电池最大放电倍率为20C，其最大放电电流为。锂聚合物电池一般属于高倍率电池，可以给多旋翼提供动力。



3. 动力系统

□ 电池

3) 内阻

- 欧姆内阻主要是指由电极材料、电解液、隔膜电阻及各部分零件的接触电阻组成，与电池的尺寸、结构、装配等有关。
- 电池的内阻不是常数，在充放电过程中随时间不断变化，不是线性关系。常随电流密度的对数增大而线性增加。
- 电池的内阻很小，我们一般用毫欧的单位来定义它。正常情况下，内阻小的电池的大电流放电能力强，内阻大的电池放电能力弱。



3. 动力系统

□ 电池



充放电电流?



4. 控制系统

□ 遥控器和接收器

(1) 作用

遥控器发送飞控手的遥控指令到接收器上，接收机解码后传给飞控制板，进而多旋翼根据指令做出各种飞行动作。遥控器可以进行一些飞行参数的设置，例如：油门的正反，摇杆灵敏度大小，舵机的中立位置调整，通道的功能定义，飞机时间记录与提醒，拨杆功能设定。高级功能有航模回传的电池电压电流数据等等。



4. 控制系统



左边定义是针对固定翼的定义。与多旋翼对应关系如下：

固定翼	多旋翼
升降舵	油门，上下运动
方向舵	偏航，偏航运动
油门	俯仰，前后运动
副翼	滚转，左右运动

图. Futaba遥控器及定义



4. 控制系统

□ 遥控器和接收器

(2) 指标参数

1) 频率

- 常用的无线电频率是72MHz与2.4GHz，目前采用的最多的是2.4GHz遥控器。
- 2.4GHz技术属于微波领域，有如下几个优点：频率高、同频几率小、功耗低、体积小、反应迅速、控制精度高。
- 2.4G微波的**直线性很好**，换句话说，控制信号的**避让障碍物的性能就差了**。控制模型过程中，发射天线应与接收天线有效的形成直线，尽量避免遥控模型与发射机之间有很大的障碍物（如房屋及仓库等）。



4. 控制系统

□ 遥控器和接收器

2) 调制方式[5]

- **PCM**是英文Pulse-Code Modulation的缩写，中文的意思是：脉冲编码调制，又称脉码调制。**PPM**是英文Pulse Position Modulation的缩写，中文意思是：脉冲位置调制，又称脉位调制，前者指的是信号脉冲的编码方式，后者指的是高频电路的调制方式。
- **PCM**编码的优点不仅在于其很强的抗干扰性，而且可以很方便的利用计算机编程，不增加或少增加成本，实现各种智能化设计。相比PCM编码，PPM比例遥控设备实现相对简单，成本较低，但较容易受干扰。

[5] 李兴赫, 孙巍. 介绍一种国产PCM比例遥控设备. 航空模型, 2001, (4): 19-20.



4. 控制系统

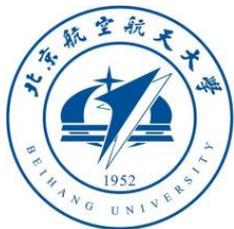
□ 遥控器和接收器

3) 通道

一个通道对应一个独立的动作，一般有6通道和10通道。多旋翼在控制过程中需要控制的动作路数有：上下、左右、前后、旋转所以最低得4通道遥控器。

4) 美国手和日本手

美国手和日本手就是遥控杆对应的控制通道的设置不同。美国左手操作杆是“升降+偏航”，右手为“俯仰+滚转”。日本手则相反。目前，国内以美国手遥控器为主。



4. 控制系统

□ 遥控器和接收器

5) 油门

- 油门杆不会自动回中，最低点为0%油门，最高点为100%油门。这种油门主要对应的是期望的推力的大小，称**直接式油门**。
- 还有一种油门是松手油门自动回中，属于**增量式油门**。这种油门大小对应的是期望的速度大小。油门回中，多旋翼的期望速度为零，也就意味着多旋翼在当地悬停。

6) 遥控距离

根据功率不同，遥控器控制的距离也有所不同。遥控器上也可以使用带有功率放大（Power Amplifier, PA）模块，带有鞭状天线，可以增大操控距离。



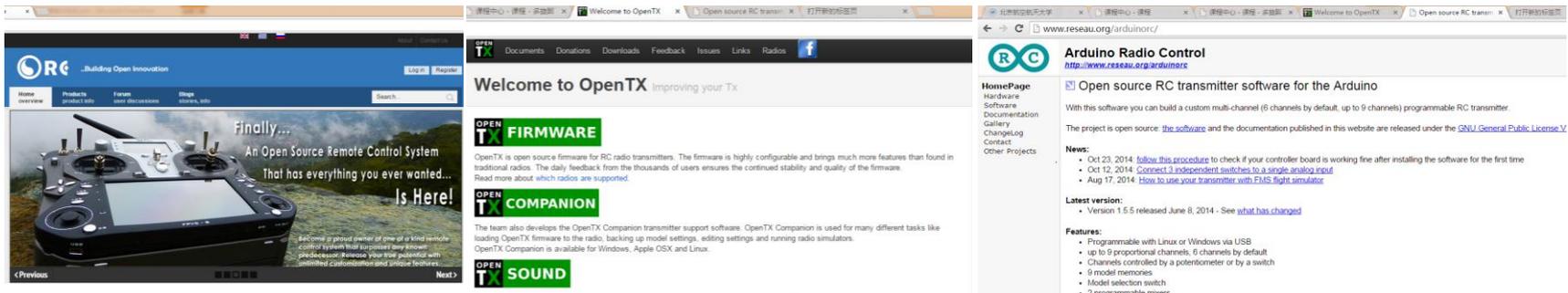
4. 控制系统

□ 遥控器和接收器

(3) 开源遥控器

针对遥控器，目前也有开源项目，可参见网站

- <http://www.os-rc.com/>
- <http://www.open-tx.org/>
- <http://www.reseau.org/arduino/rc/>
- 这样用户可以根据自己的需求定制自己的遥控器。





4. 控制系统

□ 自动驾驶仪

(1) 组成

多旋翼自动驾驶仪，分为软件部分和硬件部分。包括：

- 1) **全球定位系统 (GPS)**，得到多旋翼的位置信息；
- 2) **惯性测量单元 (IMU)**，包括三轴加速度计、三轴陀螺仪、电子罗盘（或磁力计），目的是得到多旋翼的姿态信息；市面上常说的6轴IMU是包含了三轴加速度计和三轴陀螺仪，9轴IMU是包含了三轴加速度计、三轴陀螺仪和三轴磁力计，而10轴IMU则是在9轴IMU基础上多了气压计这一轴；
- 3) **气压计和超声波测量模块**，目的是得到多旋翼绝对（气压计）或相对高度信息（超声波测量模块）；
- 4) **微型计算机，算法计算平台**；
- 5) **接口**，与各种传感器和电调、通讯设备等的硬件接口。



4. 控制系统

□ 自动驾驶仪

(2) 作用

1) **导航**。导航就是解决“**多旋翼在哪**”的问题。如何发挥各自传感器优势，得到准确的位置和姿态信息，是自驾仪飞控要做的首要的事情。**对应第七、八、九讲**

2) **控制**。控制就是解决“**多旋翼怎么去**”的问题。首先得到准确的位置和姿态信息，之后根据任务，通过算法计算出控制量，输出给电调，进而控制电机转速。**对应第十、十一、十二讲**

3) **决策**。决策就是解决“**多旋翼去哪儿**”的问题。去哪儿可能是操作手决定的，也可能是为了安全，按照规定流程的紧急处理方案。**对应第十三、十四讲**



4. 控制系统

□ 自动驾驶仪

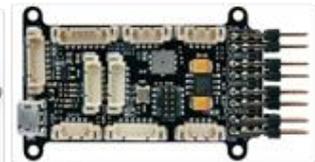
(3) 开源自驾仪



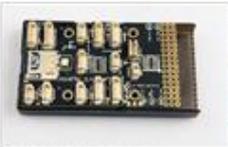
(a) Arducopter



(b) Openpilot



(c)Paparazzi



(d) Pixhawk



(e)Mikrokopter



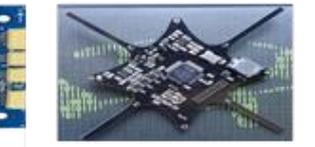
(f)KKmulticopter



(g)Multiwii



(h) Aeroquad



(i) Crazyflie



(j)CrazePony



(k)圆点博士



(l)匿名飞控

开源项目 (Open-Source Projects)	网址 (Web site URL)
Arducopter	http://ardupilot.com
Openpilot	http://www.openpilot.org/
Paparazzi	http://paparazziuav.org
Pixhawk	https://pixhawk.ethz.ch/
Mikrokopter	http://www.mikrokopter.de
KKmulticopter	http://www.kkmulticopter.kr/
Multiwii	http://www.multiwii.com/
Aeroquad	http://www.aeroquadstore.com/
Crazyflie	https://www.bitcraze.io/category/crazyflie/
CrazePony (国内)	http://www.crazepony.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/
MegaPirateNG	http://code.google.com/p/megapirateng



4. 控制系统

□ 自动驾驶仪

(3) 开源自驾仪

开源项目	网址 (Web site URL)
Taulabs	http://forum.taulabs.org/
Flexbot	http://www.flexbot.cc/
Dronecode(开源无人机航空操作系统)	https://www.dronecode.org/
Percepto(无人机开源视觉平台)	http://www.percepto.co/
Parrot API(开放SDK)	https://projects.ardrone.org/embedded/ardrone-api/index.html
3DR DRONEKIT(SDK)	http://www.dronekit.io/
DJI DEVELOPER(SDK)	http://dev.dji.com/cn
DJI MATRICE 100+ DJI Guidance	https://developer.dji.com/cn/matrice-100/
SDK for XMission(SDK)	http://www.xaircraft.cn/en/xmission/developer
EHANG GHOST SDK(SDK)	http://dev.ehang.com/



4. 控制系统

Description	尺寸(mm)	重量(g)	处理器	处理频率 (MHz)	陀螺仪	加速度计	磁力计	气压计
Arducopter	66×40.5	23	ATmega2560	16	MPU-6000	MPU-6000	HMC5843	MS5611
Openpilot	36×36	8.5	STM32F103CB	72	ISZ/IDC-500	ADX330	HMC5843	BMP085
Paparazzi(Lisa/M)	51×25	10.8	STM32F105RCT6	60	MPU-6000	MPU-6000	HMC5843	MS5611
Pixhawk	40×30.2	8	LPC2148	60	ISZ/IDC-500	SCA3100-D04	HMC5843	BMP085
Mikrokopter	44.6×50	35	ATmega644	20	ADXRS610	LIS344ALH	KMZ51	MPX4115A
Kkmulticopter	49×49	11.7	ATmega168	20	ENC-03	—	—	—
Multiwii	N/A ^a	N/A ^a	Arduino ^b	8-20	ISZ/IDC-650	LIS3L02AL	HMC5883L	BMP085
Aeroquad	N/A ^a	N/A ^a	Arduino ^b	8-20	ITG3200	ADXL345	HMC5883L	BMP085
Crazyflie 2.0	90×90 (机体)	19	STM32F405	168	MPU-9250	MPU-9250	MPU-9250	LPS25H
CrazePony-II(4版)	38.9*39.55	20	STM32f103T8U6	72	MPU6050	MPU6050	HMC5883L	MS5611
圆点博士 (2015) IV	33x33	300 (整机)	STM32F103	72	MPU6050	MPU6050	HMC5883L	超声波HC-SR04
匿名飞控V2版			STM32F407	168	MPU6050	MPU6050	AK8975	MS5611

注：a:无法确定。因为Multiwii和Aeroquad支持动态硬件配置，因此尺寸与结构相关。b:飞控板是基于Arduino开发，因此实际使用的处理器可改变。表中内容部分参考了文献Lim H, Park J, Lee D, et al. Build your own quadrotor: Open-source projects on unmanned aerial vehicles. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2012, 19(3): 33-45.



4. 控制系统

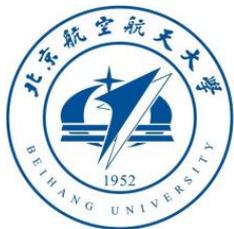
□ 地面站

(1) 作用

- 地面站软件是多旋翼地面站的重要组成部分
- 操作员通过地面站系统提供的鼠标、键盘、按钮和操控手柄等外设来与地面站软件进行交互
- 预先规划好本次任务的航迹，对多旋翼的飞行过程中飞行状况进行实时监控和修改任务设置以干预多旋翼飞行。
- 任务完成后还可以对任务的执行记录进行回放分析



图. APM地面站软件界面



4. 控制系统

□ 地面站

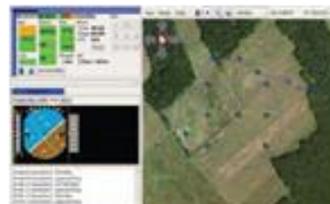
(2) 开源地面站



(a) Arducopter



(b) Openpilot



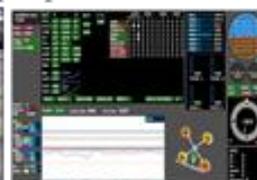
(c) Paparazzi



(d) Pixhawk



(e) Mikrokopter



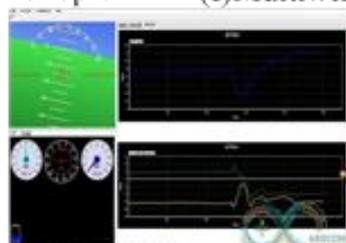
(f) Multiwii



(g) Aeroquad



(h) Crazyflie



(i) CrazePony



(j) 圆点博士

图 部分开源地面站软件截图



4. 控制系统

□ 数传

(1) 作用

数传电台是指借助DSP技术和无线电技术实现的高性能专业数据传输电台。采用数字信号处理、**数字调制解调**、**具有前向纠错**、**均衡软判决**等功能的无线数据传输电台。数传电台一端接入计算机（地面站软件），一端接入多旋翼自驾仪，通讯采用一定协议进行，从而保持自驾仪与地面站的**双向**通讯。



图 3DR数传实物图

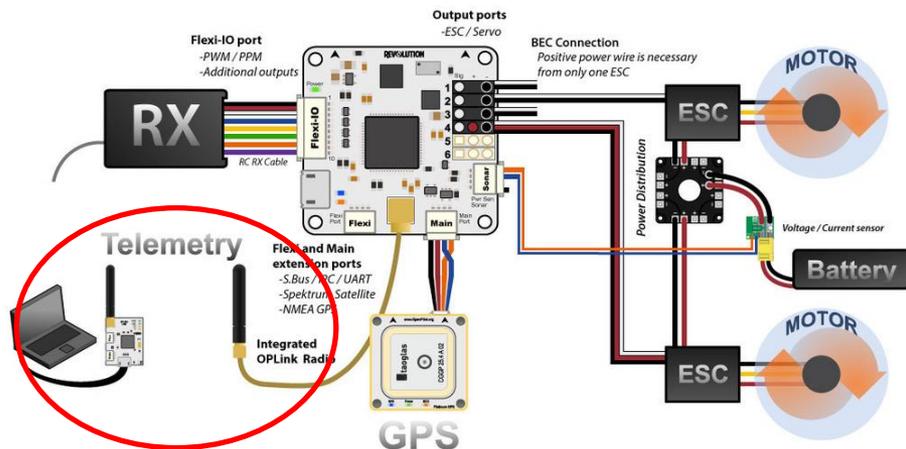


图 OpenPilot 数传连接示意图



4. 控制系统

□ 数传

(2) 指标

1) 频率。可选择：433MHz或915MHz。美洲地区可用915 MHz，欧洲和中国等一般用**433 MHz**，对915 MHz频段是禁用的。

2) 传输距离

3) 传输速率

(3) 通讯协议

- 通信协议又称通信规程，是指通信双方对数据传送控制的一种约定。只要按照一定的通讯协议，可以使得地面站软件通用起来，可以兼容不同的自驾仪。
- MAVLink通讯协议是一个为微型飞行器设计的非常轻巧的、只由头文件构成的信息编组库。MAVLink最初由L. Meier根据**LGPL (Lesser General Public License)** 许可在2009年初发表。Openpilot自驾仪采用了UAVTalk协议与地面站进行通讯。



5. 小结

(1) 多旋翼三大系统:

- 机身 (对应第三讲)
- 动力系统 (对应第四讲)
- 控制系统 (导航模块 (对应第七、八、九讲)、控制模块 (对应第十、十一、十二讲)、决策模块 (对应第十三、十四讲))

(2) “麻雀虽小，五脏俱全”，无人车、无人船结构类似

(3) 熟悉多旋翼的组成有利于选择相应的器件，也有利于提高飞行性能或判断飞行事故产生的原因、可以提高飞行性能



6. 作业

作业 2.

- (1) 机架、桨、电调、电机、电池、遥控器和GPS，各网上搜索并列举一款产品，给出其关键参数。
- (2) 任意对比两款开源飞控，说说他们的优点和缺点。
- (3) 为了兼具固定翼与多旋翼的优势，目前网上出现了一些垂直起降固定翼的产品，任意找出一款产品给出相关型号与链接，分析其飞行原理、优点与缺陷。



下堂课预告

第三讲 多旋翼的布局 and 结构设计

核心问题：

在多旋翼设计中需要注意些什么？



- (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/course/>

- (3) 关注可靠飞行控制研究组公众号 buaarfly (课件等)





谢谢!