



---

# 多旋翼飞行器设计与控制

## 第二讲 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



# 东方智慧



## 琴诗



# 核心问题

---

多旋翼由哪些基本部件组成?



# 大纲

---

1. 总体介绍

2. 机架

3. 动力系统

4. 指挥控制系统

5. 本讲小结



# 1.总体介绍

## 机架



## 动力系统



## 指挥控制系统



图2.1:多旋翼系统实物图



# 1.总体介绍



图2.2:多旋翼内部布局, 图片主体来源于网站 [ardupilot.org](http://ardupilot.org)



## 2. 机架

### □ 机身

#### (1) 作用

机身是承载多旋翼所有设备的平台。多旋翼的安全性、可用性以及续航性能都和机身的布局密切相关。因此在设计多旋翼时，其机身的尺寸、布局、材料、强度和重量等因素都是应该考虑的。

机身是承载多旋翼所有设备的平台



大疆风火轮F450



大疆风火轮 F550



零度HIGHONE四旋翼  
(机架可折叠)



大疆“御”  
(机架可折叠)



## 2. 机架

### □ 机身

#### (2) 指标参数

##### 1) 重量

##### 2) 轴距 (Diagonal Size)

轴距是用来衡量多旋翼尺寸的重要参数，它通常被定义为外圈电机组成圆周的直径。

机身的重量主要取决于其尺寸和材料。由于在相同拉力下，机身越轻意味着可分配的有效载荷越大，因此在保证机身性能的前提下，重量应尽量小。



(a) 大疆 F450机架



(b) 大疆 F550机架

图2.3: 轴距示意图



# 2. 机架

## □ 机身

### (2) 指标参数

### 3) 布局

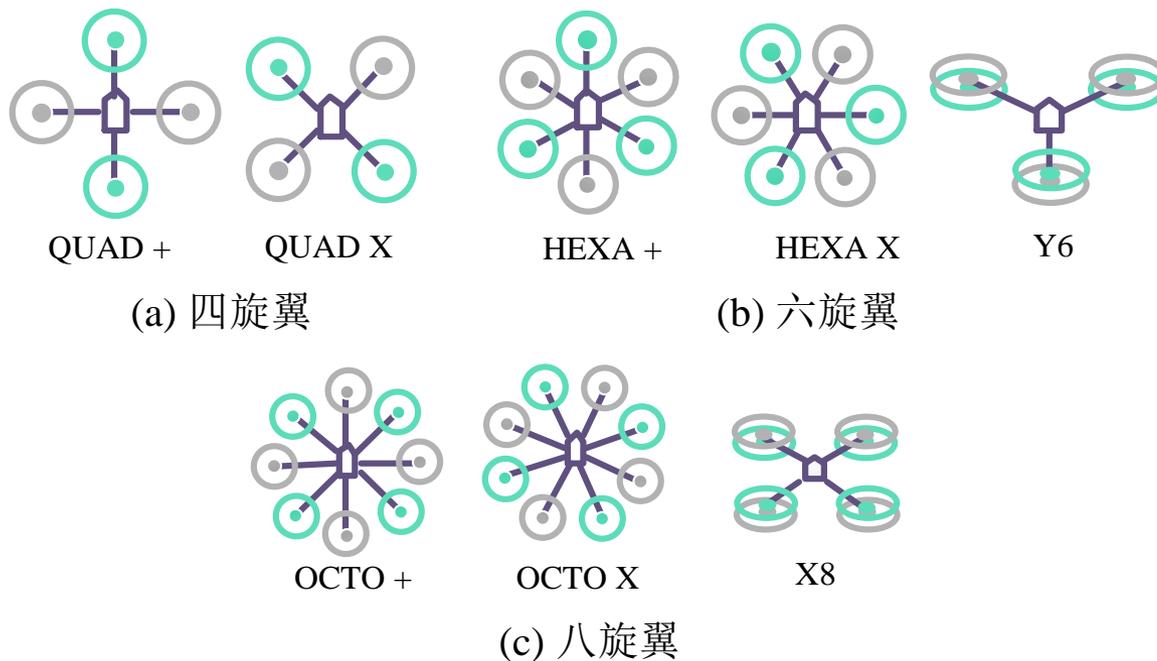
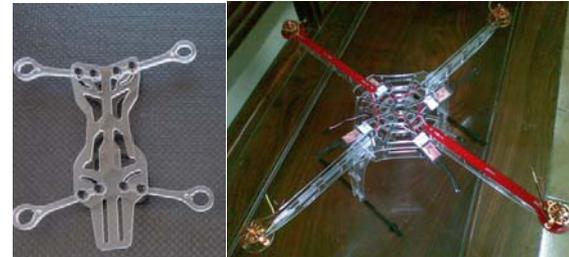


图2.4: 多旋翼基本布局



## 2. 机架

### □ 机身



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

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

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. 机架

### □ 起落架

#### (1) 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





## 2. 机架

### □ 涵道

#### (1) 作用

- 1) 保护桨叶和人身安全
- 2) 提高桨叶拉力效率
- 3) 减少噪音

#### (2) 工作原理

**伯努利原理：**  
在一个流体系统，流速越快，流体产生的压力就越小。

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拉力。

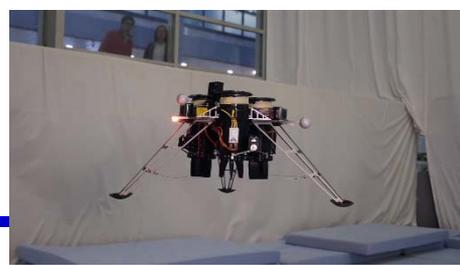
#### (3) 参数

扩散段长度和螺旋桨直径是影响涵道性能的主要参数，关于设计可参考[1]

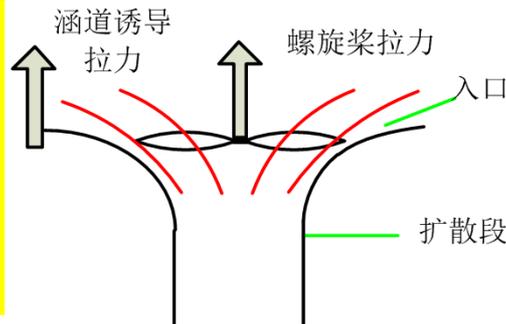
[1] Hrishikeshavan V, Black J, Chopra I. Design and performance of a quad-shrouded rotor micro air vehicle. *Journal of Aircraft*, 2014, 51(3): 779-791.



Fleye



Flying Platform



(a) 工作原理



(b) 带有涵道的四旋翼

图2.5: 涵道原理和实物

**注：尽管涵道可以提升效率增加悬停时间，但增加涵道的同时也会增加多旋翼机的重量从而使悬停时间缩短，因此最终的优化设计需要权衡与折中。**



# 3.动力系统

动力系统



- 动力系统通常包括螺旋桨、电机、电调以及电池。
- 动力系统决定了多旋翼的主要性能，例如悬停时间、载重能力、飞行速度和飞行距离等等。
- 动力系统的部件之间需要相互匹配与兼容，否则很可能无法正常工作，甚至在某些极端情况下突然失效导致事故发生



# 3.动力系统

## □ 螺旋桨

### (1) 作用

考虑到电机效率会随螺旋桨尺寸变化而变化，所以合理匹配的螺旋桨可以使电机工作在更高效的状态，从而保证在产生相同拉力情况下消耗更少的能量，进而提高续航时间。

- 1) 螺旋桨是直接产生多旋翼运动所需的力与力矩的部件
- 2) 合适的螺旋桨对提高多旋翼性能和效率有着直接的影响





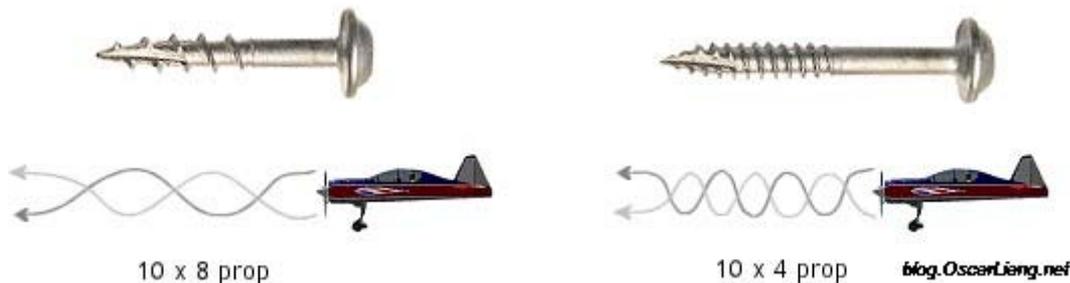
# 3.动力系统

## □ 螺旋桨

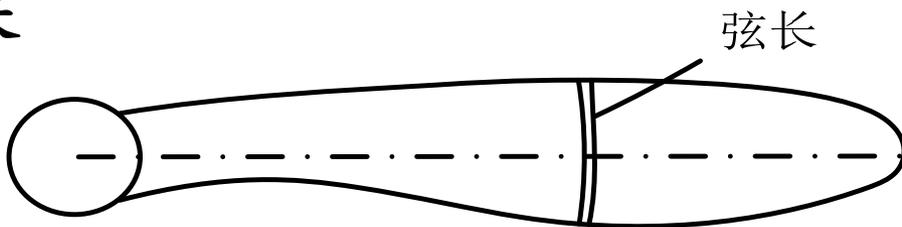
### (2) 指标参数

#### 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，就称为螺距或桨距（**Propeller Pitch**）。
- 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



APC1045MR螺旋桨示意图



# 3.动力系统

## □ 螺旋桨

### (2) 指标参数

### 3) 转动惯量

### 4) 桨叶数

- 有实验表明[2,p.65], 二叶桨的力效会比三叶桨稍高一些
- 最大拉力相同的前提下, 二叶桨直径要比三叶桨直径大

### 5) 安全转速

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



(a) 二叶桨



(b) 三叶桨



(c) 四叶桨

图2.6: 不同桨叶数螺旋桨实物图

较小的转动惯量可以提升电机的响应速度, 从而提升多旋翼的性能。



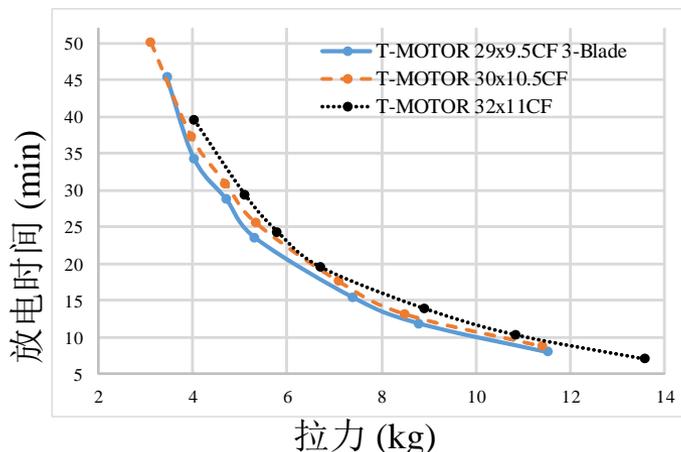
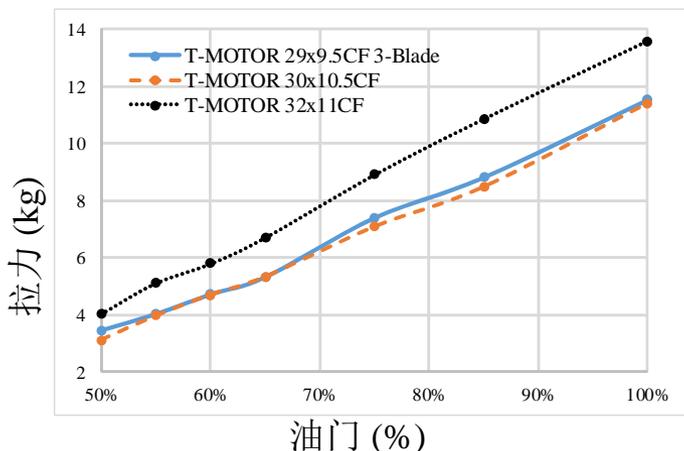
# 3.动力系统

## □ 螺旋桨

### 6) 螺旋桨力效

机械功率 (单位: W) = 输出力矩 (单位: N·m) × 螺旋桨转速 (单位: rad/s)

$$\text{力效 (单位: g/W)} = \frac{\text{拉力 (单位: g)}}{\text{机械功率 (单位: W)}}$$



(a) T-MOTOR U12 KV90拉力-油门曲线图 (b) T-MOTOR U12 KV90放电时间-拉力曲线图

图2.7: 二叶桨与三叶桨的性能对比曲线图



# 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。



振动使航拍图像质量变差



图2.8: Du-Bro螺旋桨平衡器（用于静平衡）



# 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。

- 无刷直流电机具有多种优势，比如效率高、便于小型化以及制造成本低
- 根据转子的位置，无刷直流电机可以进一步分为**外转子电机**和**内转子电机**。外转子电机可以提供更大的力矩，因此更容易驱动大螺旋桨而获得更高效率。

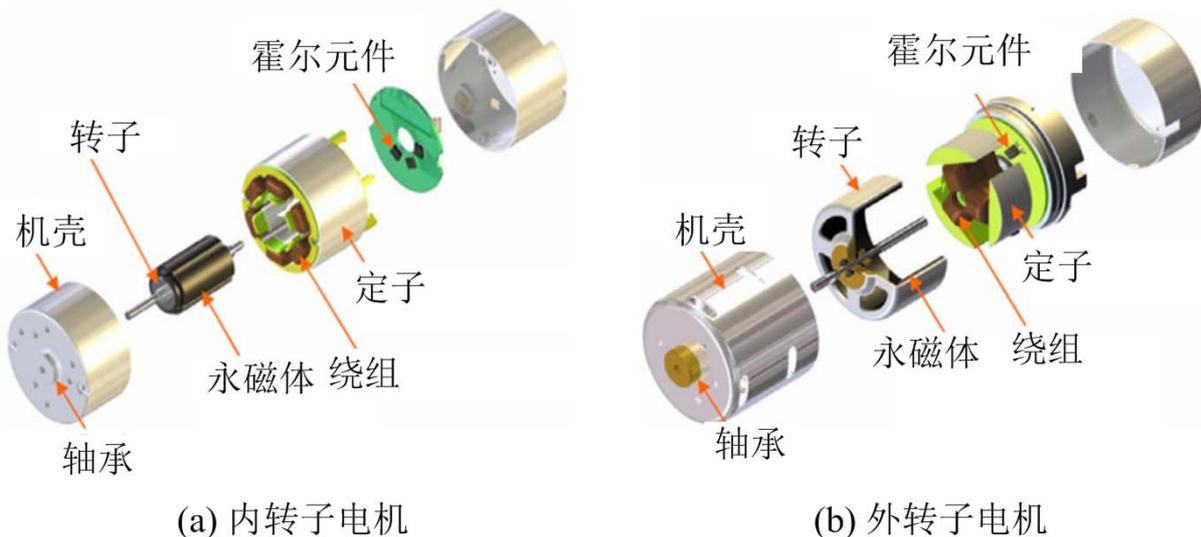


图2.9: 内转子电机和外转子电机，图片来源 [www.nidec.com](http://www.nidec.com)

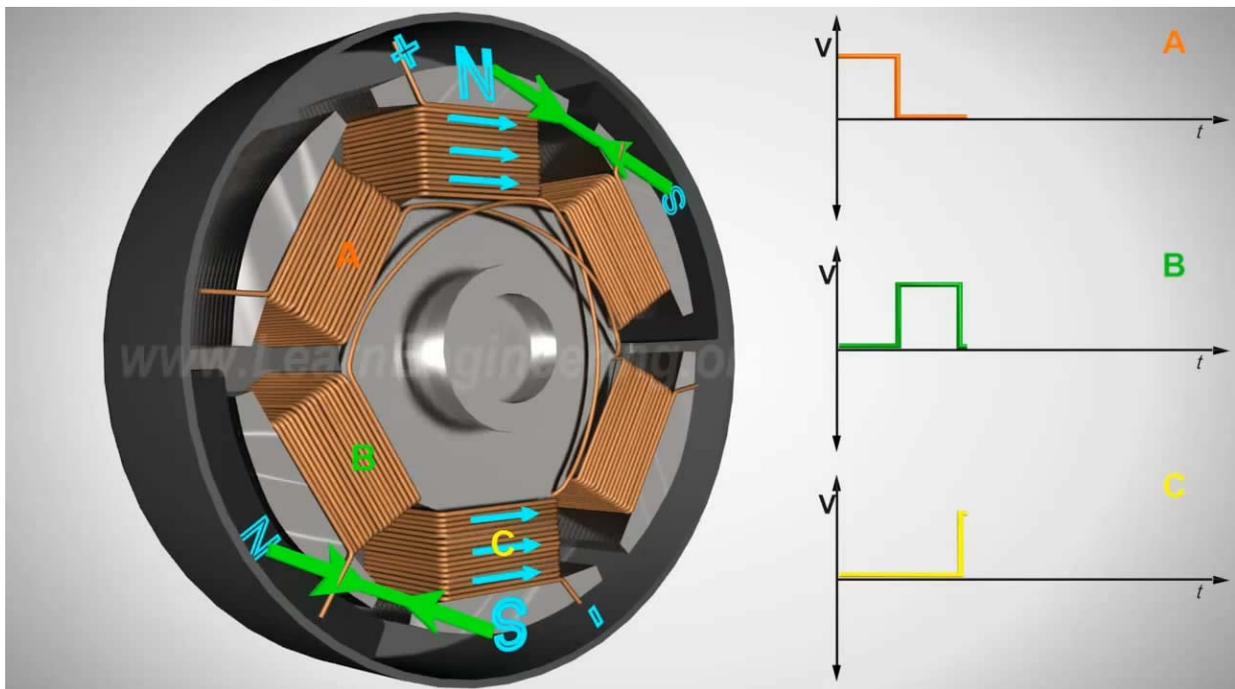


# 3.动力系统

## 电机

### (2) 工作原理

- 这是一个外转子电机，转子上有一对永磁铁，定子上有如图展示的线圈A, B, C。这时对线圈进行通电，产生电磁场。无刷直流电机的工作原理在于永磁铁磁场和电磁场相互作用，吸引转子转动。



- 当转子上的永磁铁磁场与电磁场重合时，线圈B通电，产生了新的电磁场。这时转子继续被吸引。当永磁铁磁场到达线圈B附近时，线圈C通电。然后永磁铁磁场到达线圈C附近时，线圈A通电。周期性的对线圈A, B, C进行通电，进而周而复始地驱动转子转动。

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



# 3.动力系

## □ 电机

### (3) 指标参数

#### 1) 尺寸

电机的尺寸取决于定子的大小，由一个四位数字来表示。例如2212（或写成22×12）电机，前两个数字代表定子直径（单位mm），后两个数字代表定子高度（单位mm），因此2212电机表示电机定子直径是22mm，定子高度为12mm。

#### 2) 标称空载KV值

- 无刷直流电机的KV值指的是空载情况下，外加1V电压得到的电机转速值（单位：RPM）。
- 大型螺旋桨可以选用KV值较小的电机，而小型螺旋桨可以选用KV值较大的电机

3660-1700KV



RS2205  
2300KV





# 3.动力系统

## 电机

### 3) 标称空载电流和电压

在空载（不安装螺旋桨）试验中，

对电机施加空载电压（通常为**10V**）时测得的电机电流被称为空载电流。

### 4) 最大电流/功率

最大峰值（瞬时）电流/功率：电机能承受的最大瞬时通过的电流/功率；

最大连续（持续）电流/功率：电机能允许持续工作（规定时间）而不烧坏的最大连续电流/功率

### 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

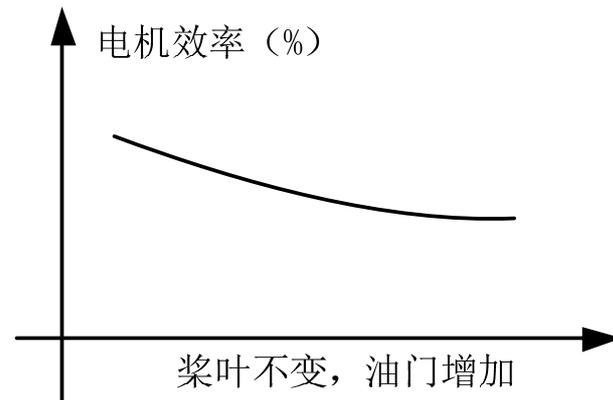
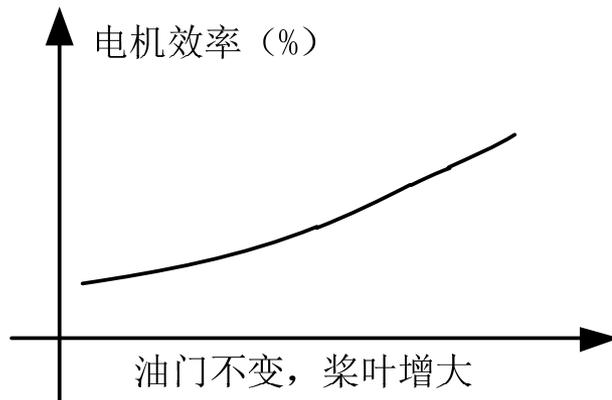
Specifications	V2814	推荐多旋翼重量 ≤620g x轴数
Stator Diameter	28mm	定子瓶
Stator Thickness	14mm	定子厚度
No. of Stator Arms	12	定子槽数
No. of Stator Poles	14	定子极数
Motor Kv	770	电机KV
No-Load Current (A/10V)	0.8A	空载电流
Motor Resistance	70m	电机电阻
Max Continuous Current	30A/30S	最大连续电流
Max Continuous Power	550W	最大连续功率
Weight	118g	重量（含长线）
Outside Diameter	35mm	转子直径
Shaft Diameter	4mm	出轴直径
Body Length	36mm	电机长度
Overall Shaft Length	38.5mm	电机含轴总长度
Max Lipo Cell	2-4S	最大电池节数
ESC	30A	建议使用电调
Recommended Prop(inch)	APC1047	推荐螺旋桨规格



## 3. 动力

### 电机

#### 6) 电机效率



电机效率是评估性能的一个重要参数

电功率 (单位: W) = 电机输入电压 (单位: V) × 电机电流 (单位: A)

$$\text{电机效率} = \frac{\text{机械功率 (单位: w)}}{\text{电功率 (单位: W)}}$$

#### 7) 总力效

总力效的计算方式如下:

$$\begin{aligned} \text{总力效 (单位: g/W)} &= \frac{\text{螺旋桨拉力 (单位: g)}}{\text{电功率 (单位: W)}} \\ &= \text{螺旋桨力效} \times \text{电机效率} \end{aligned}$$



# 3.动力系统

表中给出了一款电机，4种不同的螺旋桨，在不同油门下的总力效。针对特定任务，一般我们可以遍历这些组合，选取一个油门、力效和工作温度的一个折中。

电机型号	电压 (V)	螺旋桨型号	油门指令	电流 (A)	功率 (W)	拉力 (g)	转速 (RPM)	力效 (G/W)	扭矩 (N·m)	温度 °C
T-MOTOR MN5212 KV340	24	T-MOTOR 15x5CF	50%	3.3	79	745	3821	9.44	0.142	38
			55%	4.2	99.8	910	4220	9.11	0.172	
			60%	5.2	123.6	1075	4576	8.7	0.198	
			65%	6.3	150.7	1254	4925	8.32	0.232	
			75%	9.1	217.2	1681	5663	7.74	0.31	
			85%	12.2	292.1	2115	6315	7.24	0.382	
			100%	17.8	426.7	2746	7167	6.44	0.498	
		T-MOTOR 18x6.1CF	50%	5.7	137.5	1318	3596	9.58	0.29	74
			55%	7.4	178.1	1612	3958	9.05	0.344	
			60%	9.3	222	1901	4310	8.56	0.411	
			65%	11.6	278.2	2259	4622	8.12	0.472	
			75%	16.5	395.5	2835	5226	7.17	0.605	
			85%	22.1	531.1	3477	5751	6.55	0.737	
			100%	31	744.7	4355	6358	5.85	0.918	

图2.10: 电机T-MOTOR MN5212 KV420性能参数表



# 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
- 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
- 4) 电调还有一些其它辅助功能

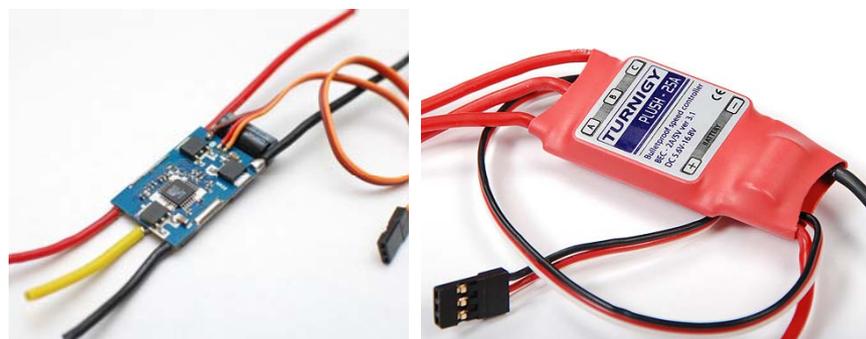
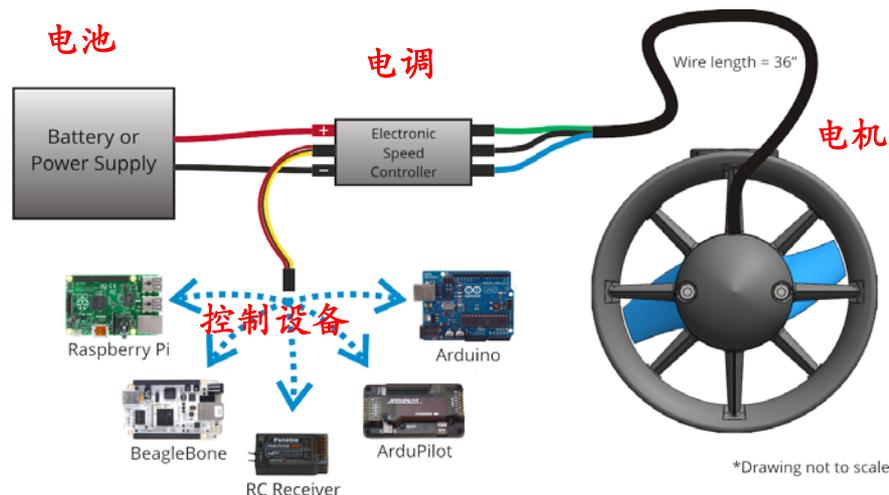


图2.11 电调实物图



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



# 3.动力系统

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



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



## 电调

### (2) 指标参数

#### 1) 最大持续/峰值电流

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。

- 最大持续电流指的是在正常工作模式下的持续输出电流
- 峰值电流指的是电调能承受的最大瞬时电流。



#### 2) 电压范围

电调能够正常工作所允许输入的电压范围也是非常重要的参数。一般在电调说明书上可以看到标注例如“3-4S LiPo”字样，表示这个电调适用于3到4节电芯串联的锂聚合物电池，也就是说它的电压范围为11.1V~14.8V。



# 3.动力系统

## □ 电调

### (2) 指标参数

#### 3) 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**。

#### 4) 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

### (2) 指标参数

### 5) 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

### 6) 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



图2.12: 好盈无刷电调参数编程卡

Programmable Items	Value								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Basic Items</b>									
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
<b>Advanced Items</b>									
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2.13: 一张电调参数配置表



# 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。

#### 2) 正弦波驱动（矢量控制，Field Oriented Control）

正弦驱动在运行平稳性、调速范围、减振减噪方面优于方波驱动。目前可采用光电编码器、霍尔传感器或者基于观测器的方法测量转子角度。因为多旋翼电机始终工作在高转速状态下，可以基于观测器的方法进行矢量调制，节约成本。



# 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。现在可用来做航模动力的电池种类很多，常见的有锂聚合物电池（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。



锂电池



镍氢电池



# 3.动力系统

## □ 电池

### (2) 指标参数

航模专用锂聚合物电池 (LiPo 电池) 单节电芯的标称电压是3.7V, 充满电可达4.2V, 通常设定放电后的保护电压为3.6V左右。

#### 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, 容量是单个电池的两倍。
- 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。

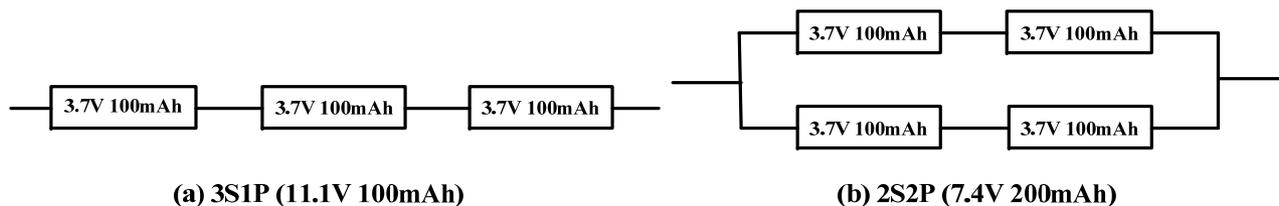


图2.15: 电芯组合方式



# 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，所以导致其剩余电量与放电时间并非线性关系。
- 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)，一般无人机在低于3.6V之前会电量报警



# 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，越大表明放电越快。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100A。
- 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。
- 放电电流不能超过其最大电流限制，否则可能烧坏电池



# 3.动力系统

## □ 电池

### 4) 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。常随着电池状态和使用寿命变化而变化。。
- 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。

### 5) 能量密度

能量密度指在一定的空间或质量物质中储存能量的大小



# 4. 指挥控制系统

---

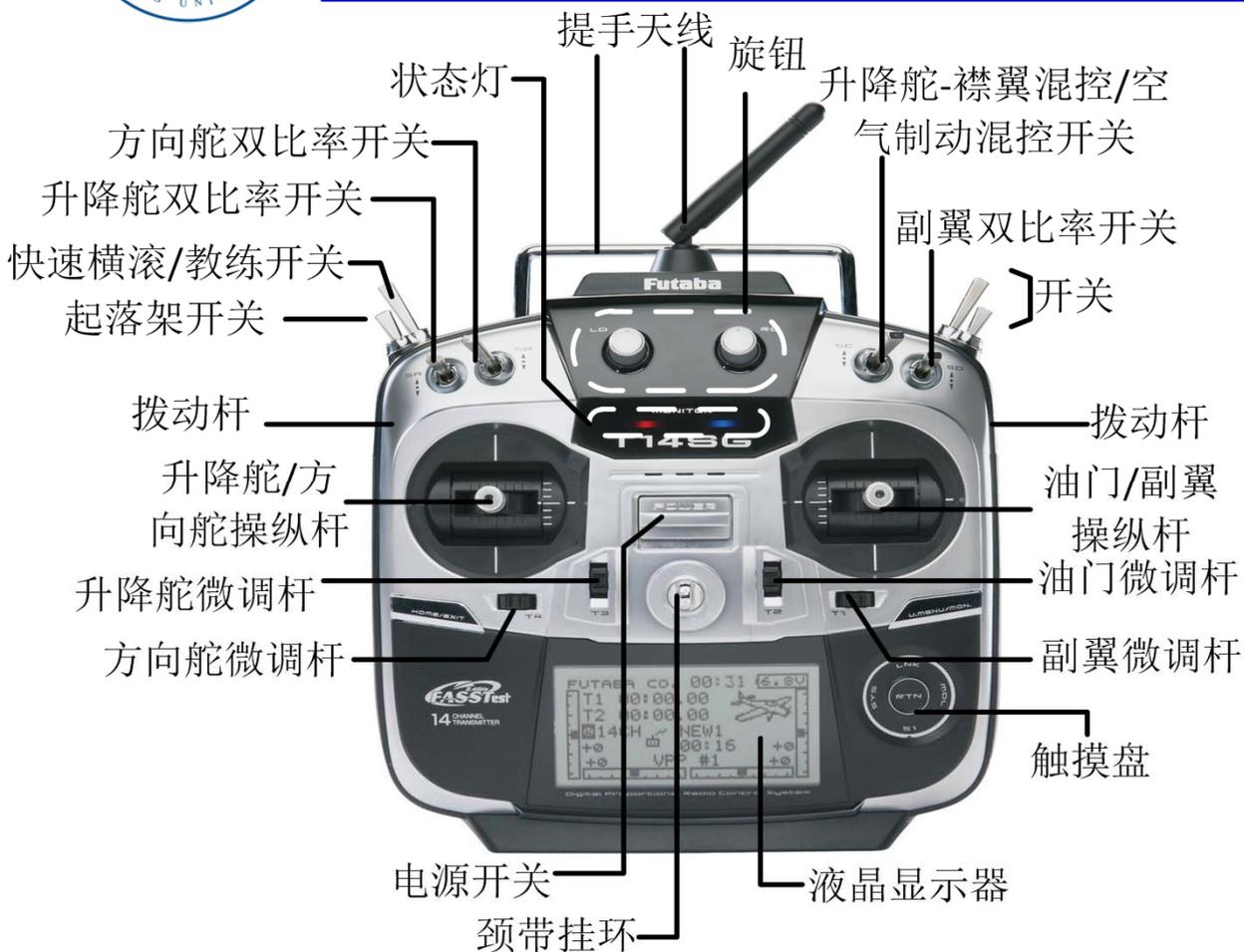
## □ 遥控器和接收器

### (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. 指挥控制系统



左边图片定义是针对固定翼的日本手定义。与多旋翼美国手对应关系如下：

固定翼 (日本手)	多旋翼 (美国手)
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



Futaba接收器

图2.16: Futaba遥控器及定义



# 4. 指挥控制系统

## □ 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. 指挥控制系统

## □ 遥控器和接收器

### (2) 指标参数

#### 2) 调制方式

- **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。

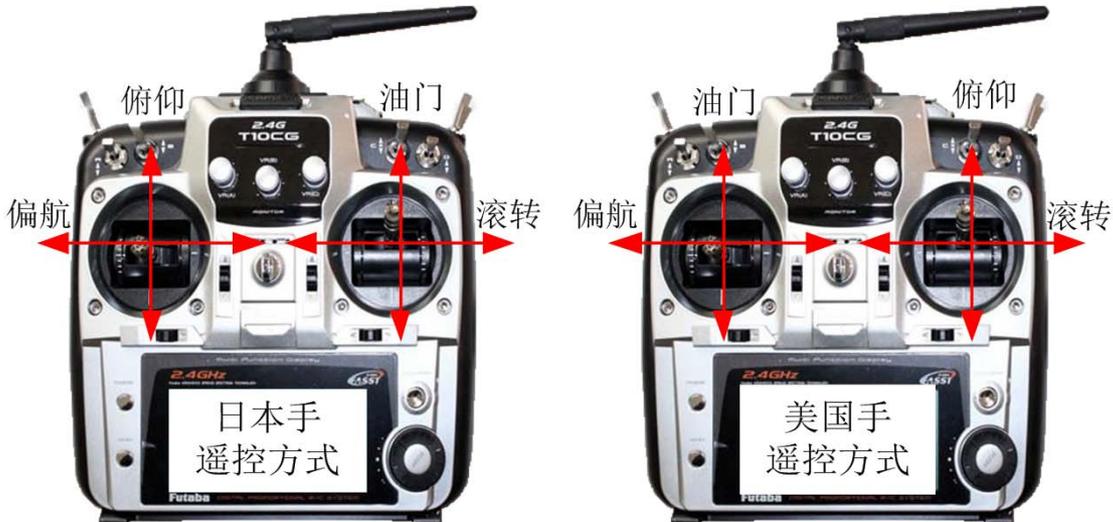


## 4. 指挥控

### □ 遥控器和操

#### (2) 指标参数

#### 3) 通道



油门：控制上下运动，对应固定翼油门杆  
俯仰：控制前后运动，对应固定翼升降舵

偏航：控制机头转向，对应固定翼方向舵  
滚转：控制左右运动，对应固定翼副翼

一个通道对应一个独立的动作，一般有六通道、十通道等。多旋翼在控制过程中需要控制的动作路数有：油门、偏航、俯仰、滚转，所以至少得四个通道遥控器。

#### 4) 控制模式 -- 美国手和日本手

美国手和日本手就是遥控器对应的控制通道的设置不同。美国左手操作杆是“油门+偏航”，右手为“俯仰+滚转”。日本手则是左手“俯仰+偏航”，右手“油门+滚转”。目前，国内多旋翼操控以美国手遥控器为主。



# 4. 指挥控制系统

## □ 遥控器和接收器

### (2) 指标参数

### 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**。

### 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。





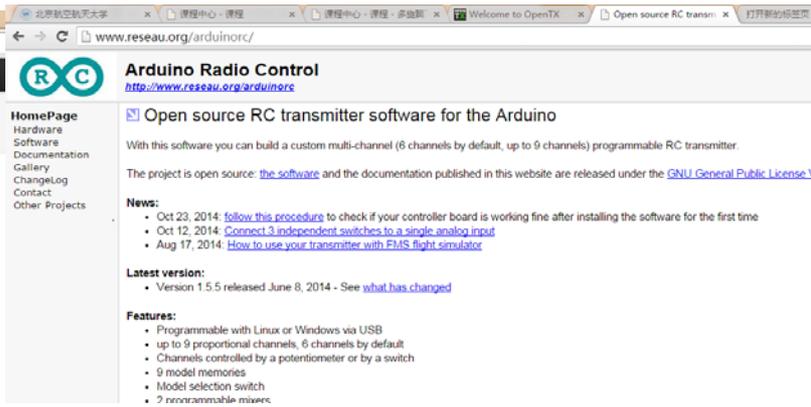
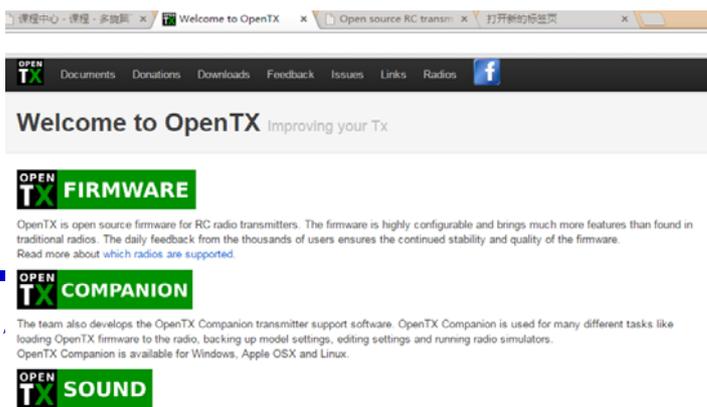
# 4. 指挥控制系统

## □ 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/arduinorc/>
- 这样用户可以根据自己的需求定制自己的遥控器。





# 4. 指挥控制系统

## 自动驾驶仪



飞控板计算芯片



GPS模块

### (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) 接收器；
- 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；
- 3) 气压计和超声波测距模块；
- 4) 微型计算机；
- 5) 接口。



气压计



超声波模块



IMU模块



# 4. 指挥控制系统

## □ 自动驾驶仪

### (2) 作用

1) **感知**。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. 指挥控制系统

## □ 自动驾驶仪

### (3) 开源自驾仪

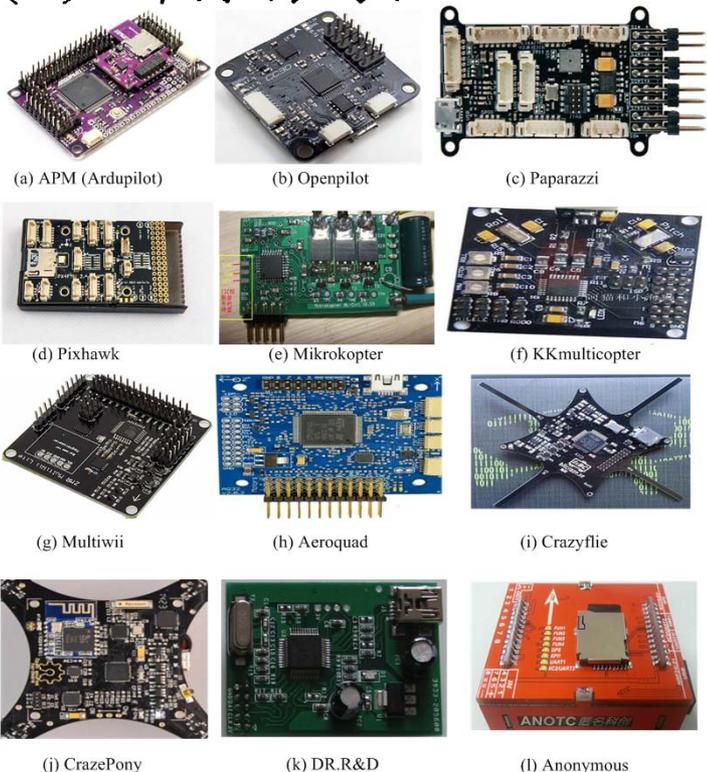


图2.18: 多旋翼开源自驾仪

开源项目 (Open-Source Projects)	网址 (Web site URL)
Ardupilot	<a href="http://ardupilot.com">http://ardupilot.com</a>
Openpilot	<a href="http://www.openpilot.org/">http://www.openpilot.org/</a>
Paparazzi	<a href="http://paparazziuav.org">http://paparazziuav.org</a>
Pixhawk	<a href="https://pixhawk.ethz.ch/">https://pixhawk.ethz.ch/</a>
Mikrokopter	<a href="http://www.mikrokopter.de">http://www.mikrokopter.de</a>
KKmulticopter	<a href="http://www.kkmulticopter.kr/">http://www.kkmulticopter.kr/</a>
Multiwii	<a href="http://www.multiwii.com/">http://www.multiwii.com/</a>
Aeroquad	<a href="http://www.aeroquadstore.com/">http://www.aeroquadstore.com/</a>
Crazyflie	<a href="https://www.bitcraze.io/category/crazyflie/">https://www.bitcraze.io/category/crazyflie/</a>
CrazePony (国内)	<a href="http://www.crazepony.com/">http://www.crazepony.com/</a>
圆点博士 (国内)	<a href="http://www.etootle.com/">http://www.etootle.com/</a>
匿名飞控 (国内)	<a href="http://www.anotc.com/">http://www.anotc.com/</a>
Autoquad	<a href="http://autoquad.org/">http://autoquad.org/</a>
MegaPirate	<a href="http://megapiratex.com/index.php">http://megapiratex.com/index.php</a>
Erlrobot	<a href="http://erlerobotics.com/">http://erlerobotics.com/</a>
MegaPirateNG	<a href="http://code.google.com/p/megapirateng">http://code.google.com/p/megapirateng</a>



# 4.指挥控制系统

## □ 自动驾驶仪

### (3) 开源自驾仪

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



# 4. 指挥控制系统

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
APM (Ardupilot)	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 <sup>a</sup>	N/A <sup>a</sup>	Arduino <sup>b</sup>	8-20	ISZ/IDC-650	LIS3L02AL	HMC5883L	BMP085
Aeroquad	N/A <sup>a</sup>	N/A <sup>a</sup>	Arduino <sup>b</sup>	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. 指挥控制系统

## □ 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2.19: APM地面站软件界面



# 4. 指挥控制系统

## □ 地面站

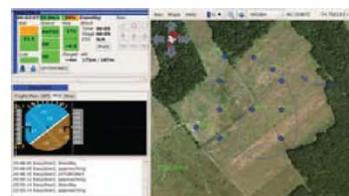
### (2) 开源地面站



(a) MissionPlanner (Ardupilot)



(b) Openpilot



(c) Paparazzi



(d) QGroundControl (PX4)



(e) Mikrokopter



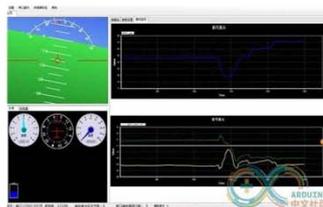
(f) Multiwii



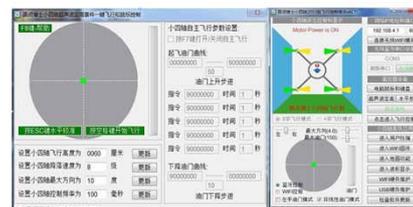
(g) Aeroquad



(h) Crazyflie



(i) CrazePony



(j) D.R R&D

图2.20: 部分开源地面站软件截图



# 4. 指挥控制系统

## □ 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2.21: 3DR数传实物图

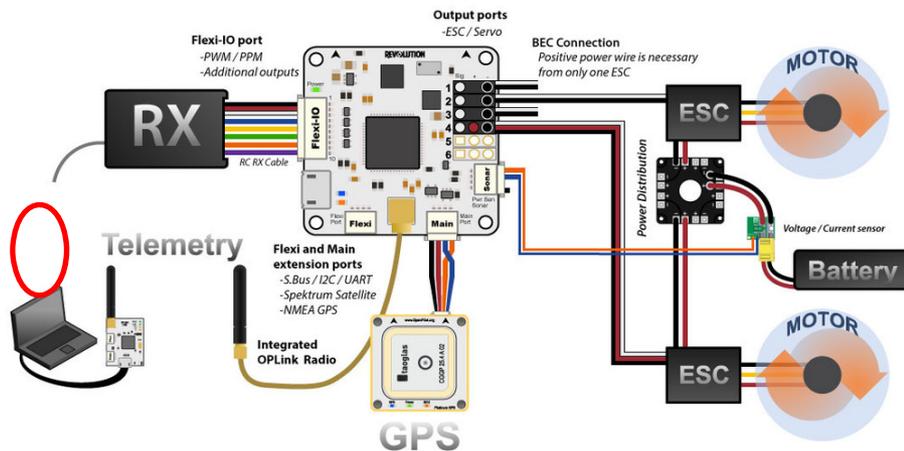


图2.22: Openpilot 数传连接示意图



# 4. 指挥控制系统

## □ 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最初由劳伦兹·迈耶根据**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.本讲小结

---

### (1) 多旋翼三大系统:

- 机架 (对应第三讲)
- 动力系统 (对应第四讲)
- 指挥控制系统 (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



# 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

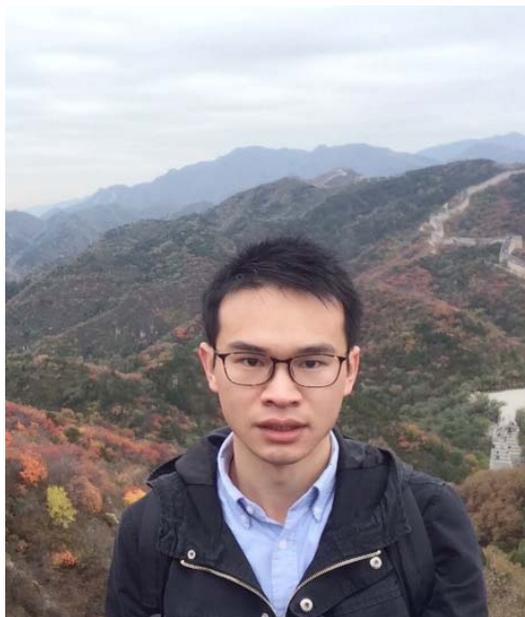
(6) 有疑问可联系课程总助教戴训华, 邮箱: [dai@buaa.edu.cn](mailto:dai@buaa.edu.cn)



# 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。

