

多旋翼飞行器：从原理到实践

第二讲 系统基本组成

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. 总体介绍
2. 机架
3. 动力系统
4. 通信系统
5. 指挥控制系统
6. 载荷系统
7. 本讲小结

1. 总体介绍



机架



动力系统



通信系统



指挥控制系统

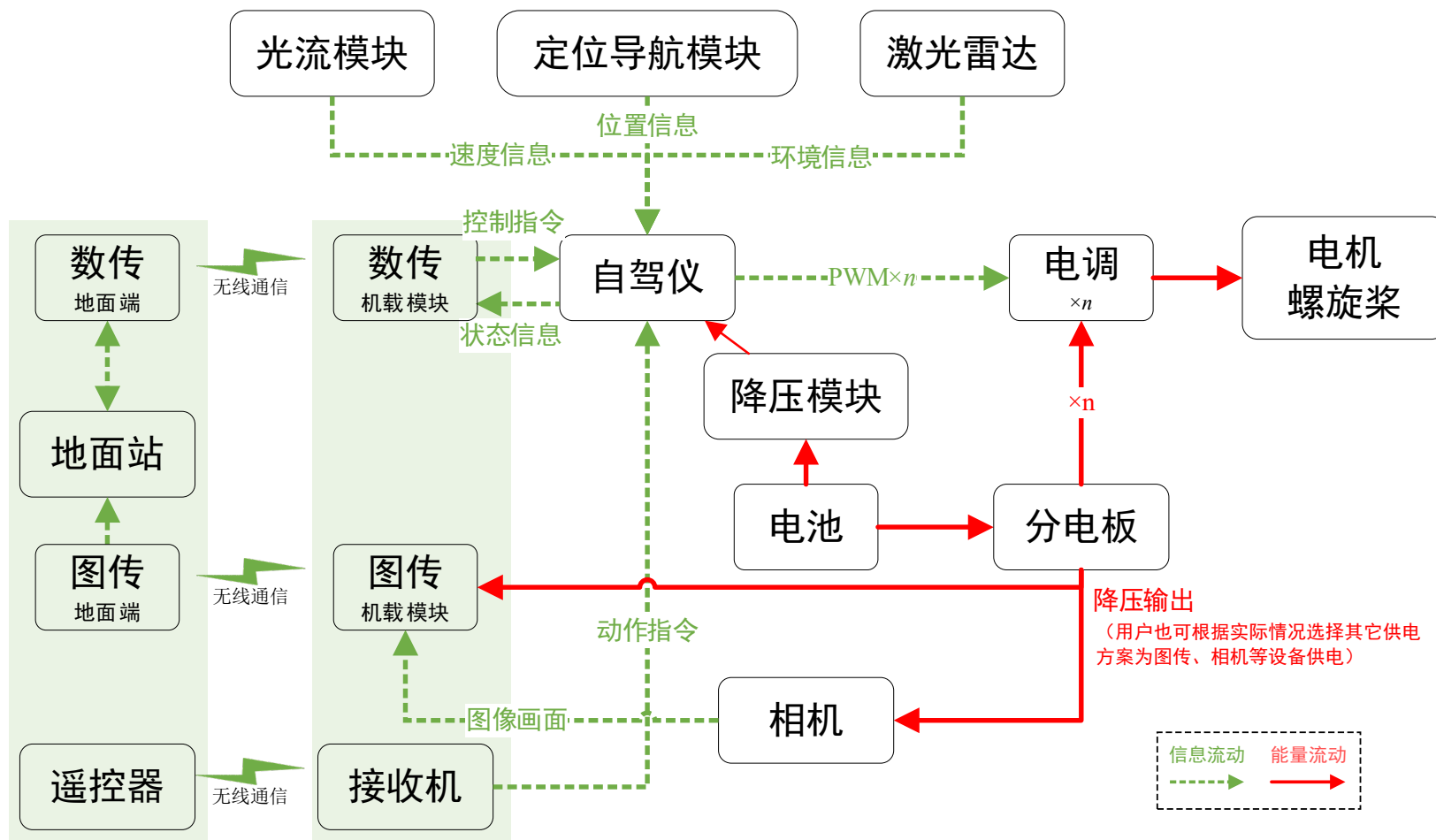


载荷系统

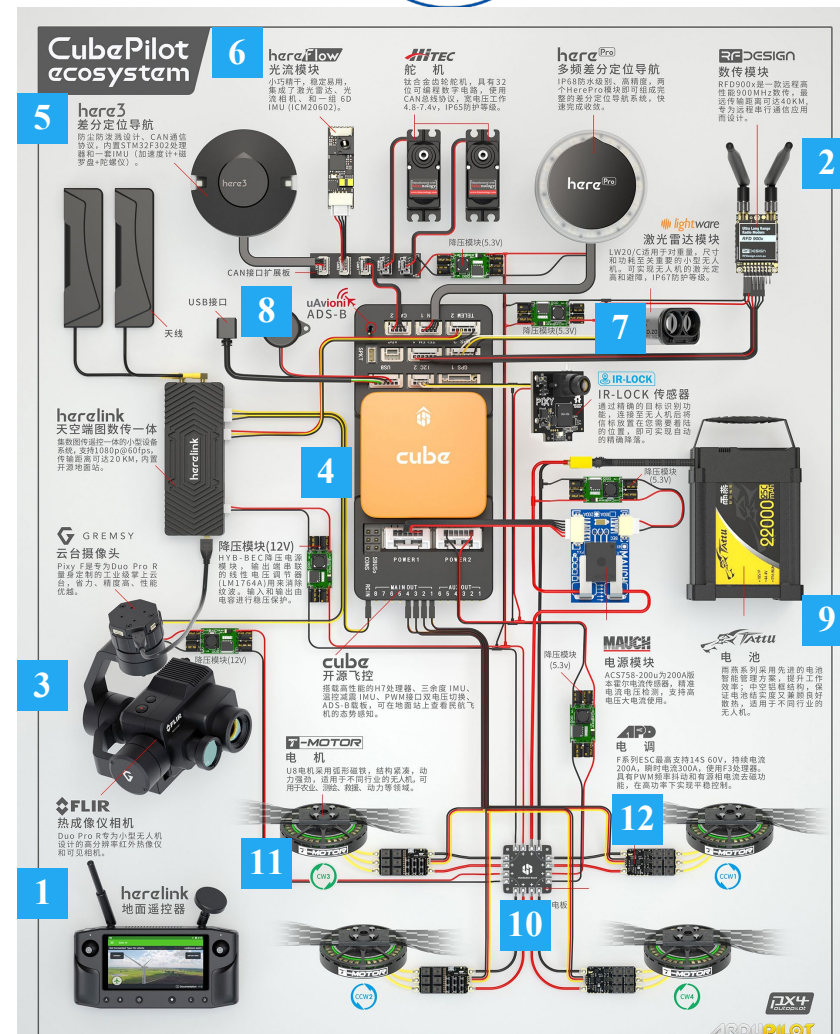


多旋翼系统实物图

1. 总体介绍



信息流动和能量流动示意图



CubePilot多旋翼开源飞控硬件接线图

2. 机架

机身

(1) 功能

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)



极飞X650 v4 Frame
(机架可折叠)

2. 机架

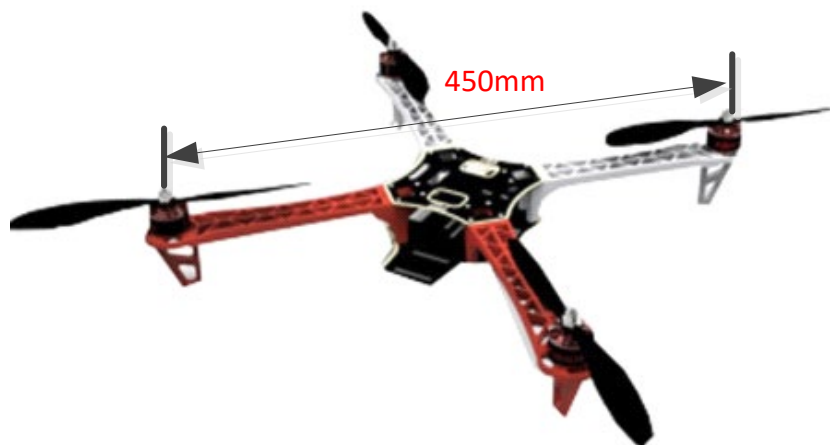
机身



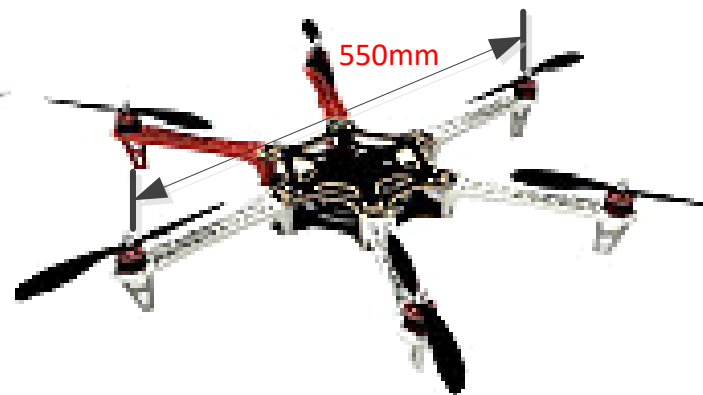
(2) 指标参数

① 重量

② 轴距 (Diagonal Size)：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。



大疆F450机架



大疆F550机架

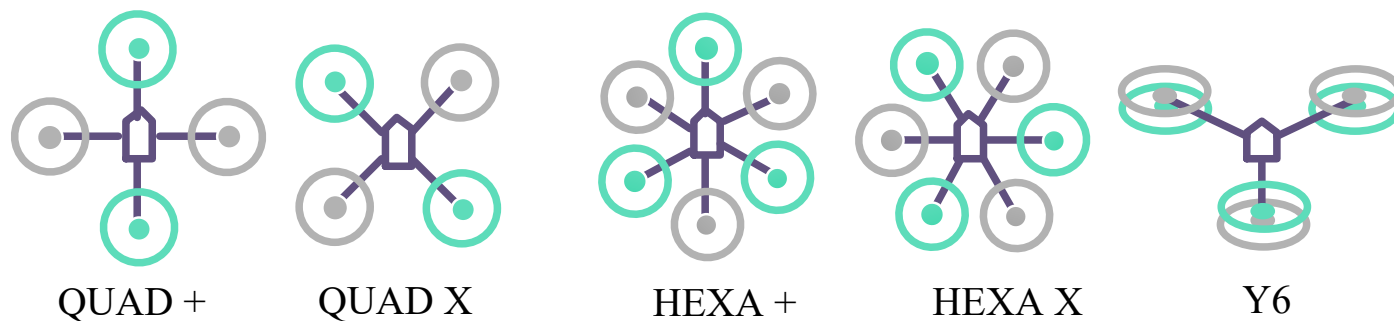
2. 机架

机身



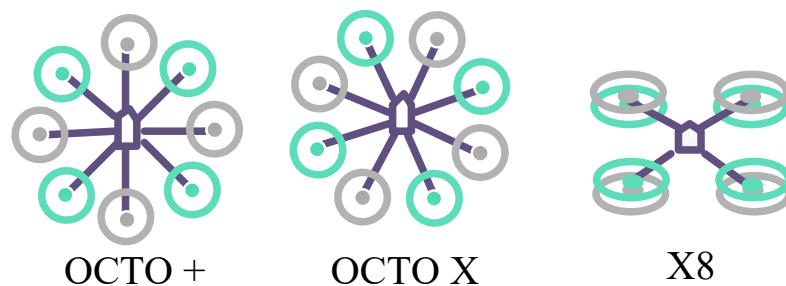
(2) 指标参数

③ 布局



(a) 四旋翼

(b) 六旋翼



(c) 八旋翼

多旋翼基本布局

2. 机架

机身



(2) 指标参数

④ 机臂横截面



DJI 御 MAVIC AIR 2
(a) 方形旋翼臂



DJI 经纬 M300 RTK
(b) 圆形旋翼臂

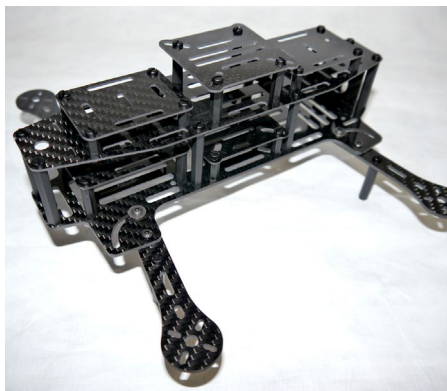


赫星860MM六轴多旋翼无人机
(c) 流线型旋翼臂

不同截面的多旋翼机臂

2. 机架

机身



(2) 指标参数

⑤ 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)	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. 机架

起落架

主要功能

- 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

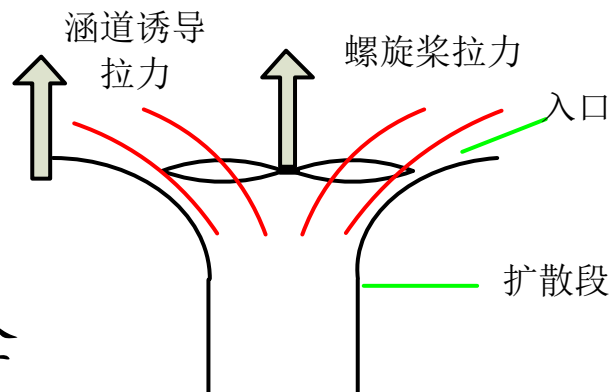


2. 机架

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



(a) 工作原理



(b) 带有涵道的四旋翼

涵道原理和实物

(2) 工作原理

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。

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。

(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.

3. 动力系统

螺旋桨



(1) 功能

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



3. 动力系统

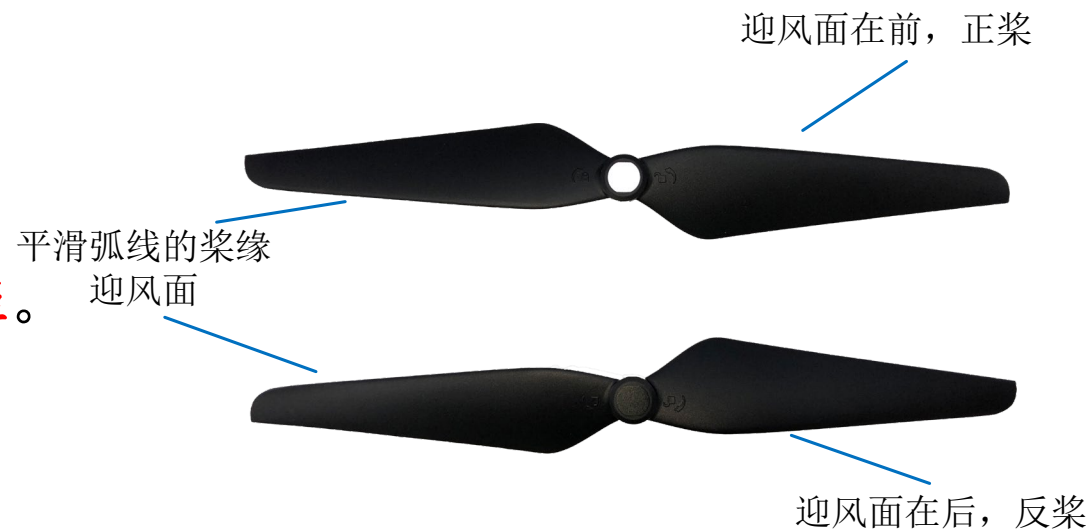
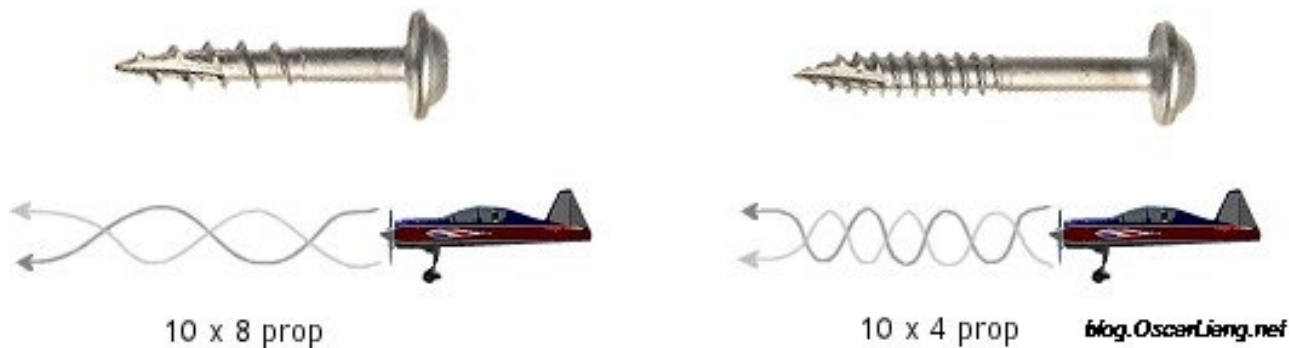
螺旋桨



(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。
- 对于大尺寸的螺旋桨则一般使用“数字×数字”表示螺旋桨的型号，如17×13。



3. 动力系统

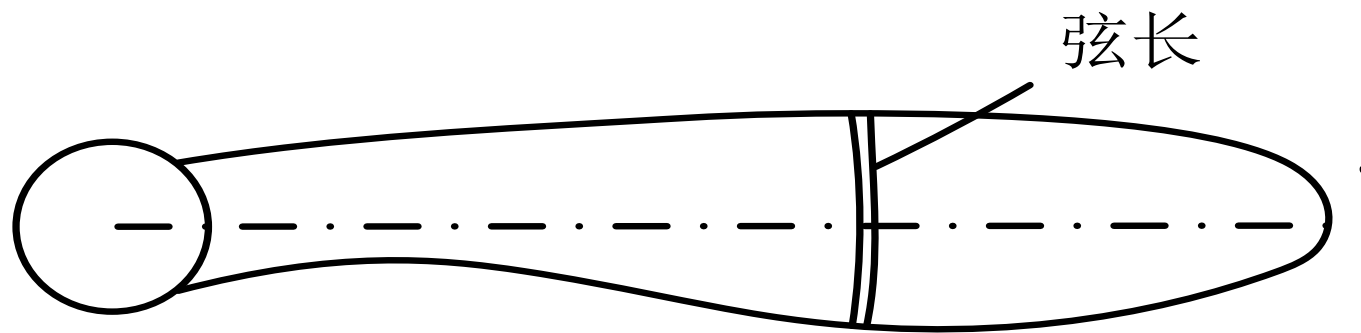
螺旋桨



(2) 指标参数

2) 弦长

弦长的定义如图所示，由于弦长随着径向位置的不同会有区别，一般选择螺旋桨半径 $2/3$ 处的弦长作为螺旋桨**标称弦长**。



3. 动力系统

螺旋桨

(2) 指标参数

3) 转动惯量

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。

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



(c) 5叶桨

[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

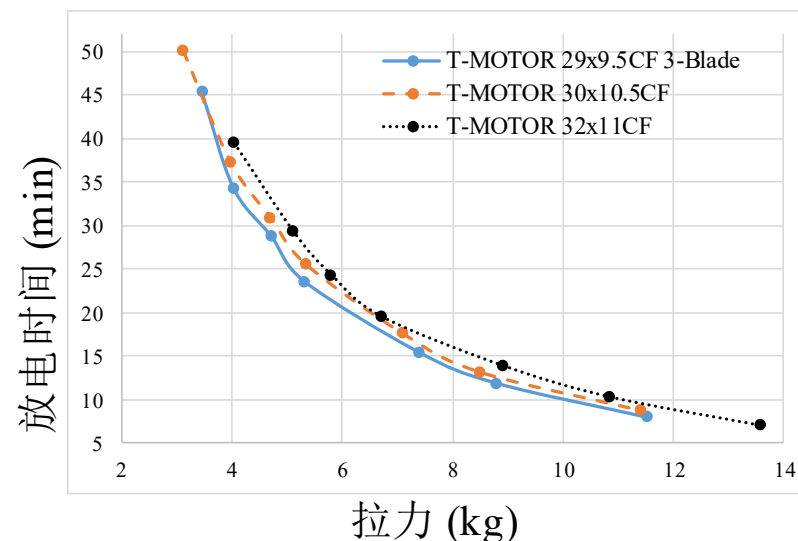
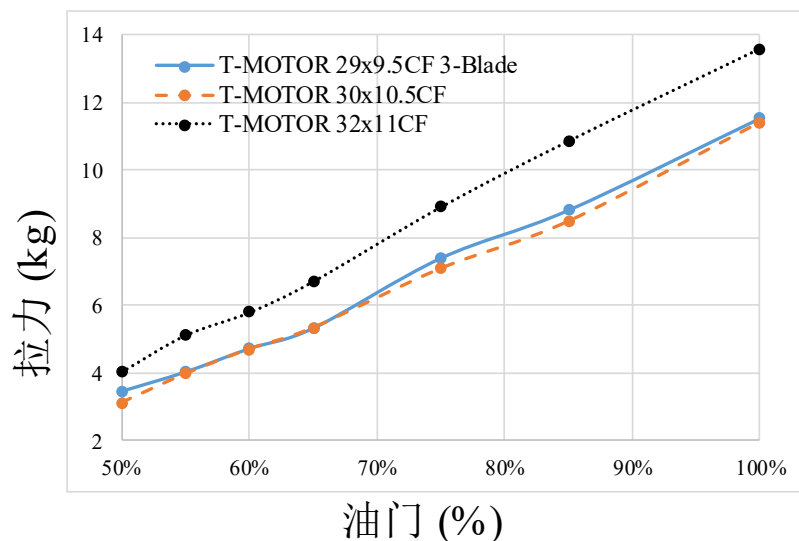


(2) 指标参数

6) 螺旋桨力效

机械功率（单位：W）= 扭矩（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

二叶桨与三叶桨的性能对比曲线图

3. 动力系统

螺旋桨



(2) 指标参数

7) 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

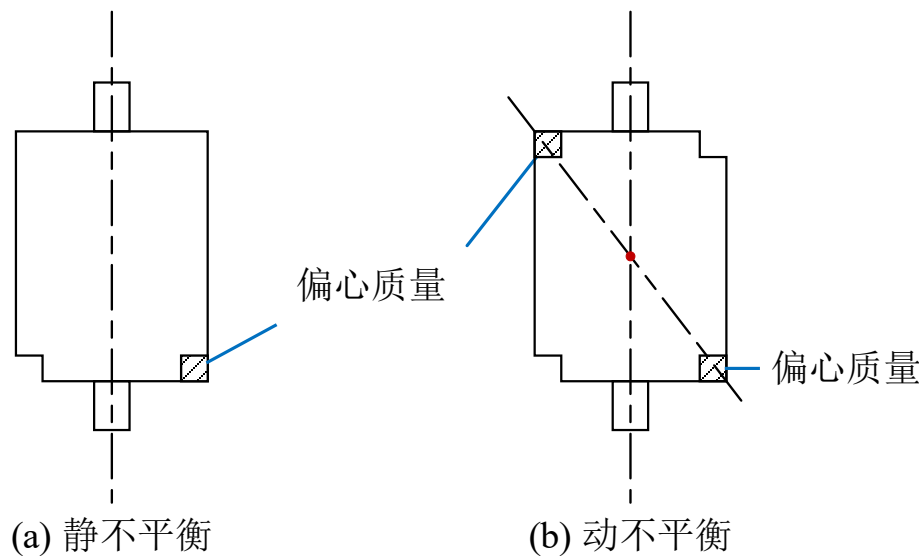


(3) 静平衡和动平衡

- 进行静平衡和动平衡的目的是减少振动
- 静不平衡**出现在所有惯性力的矢量和不为零，即其重心（重量中心）与旋转轴心不重合时；
- 动不平衡**出现在所有惯性力和力偶矩矢量和不全为零时；
- 出现不平衡的情况时，请**更换**螺旋桨。



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



(c) DuBro螺旋桨平衡器

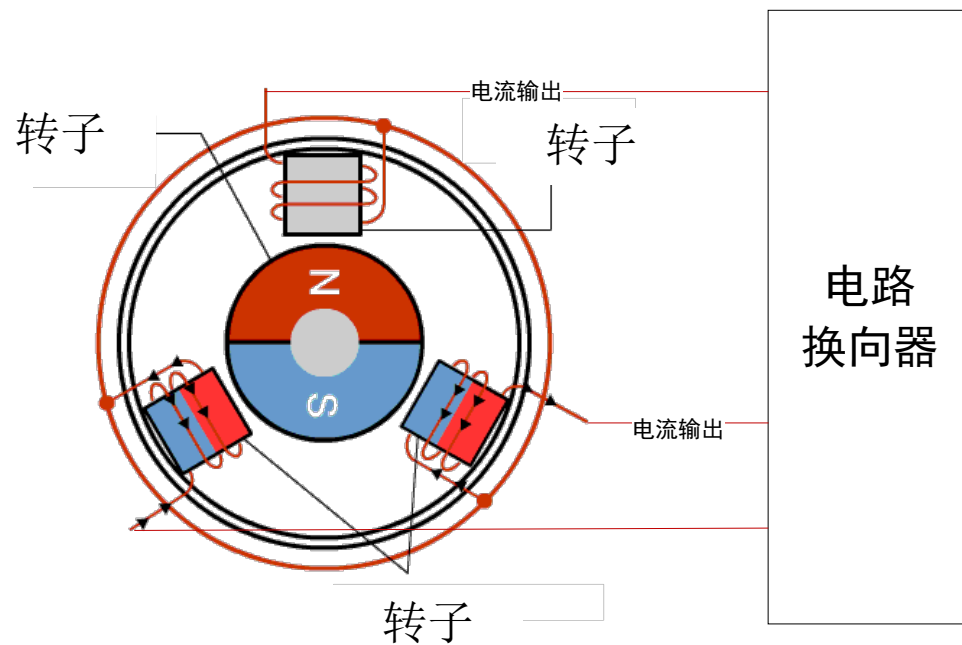
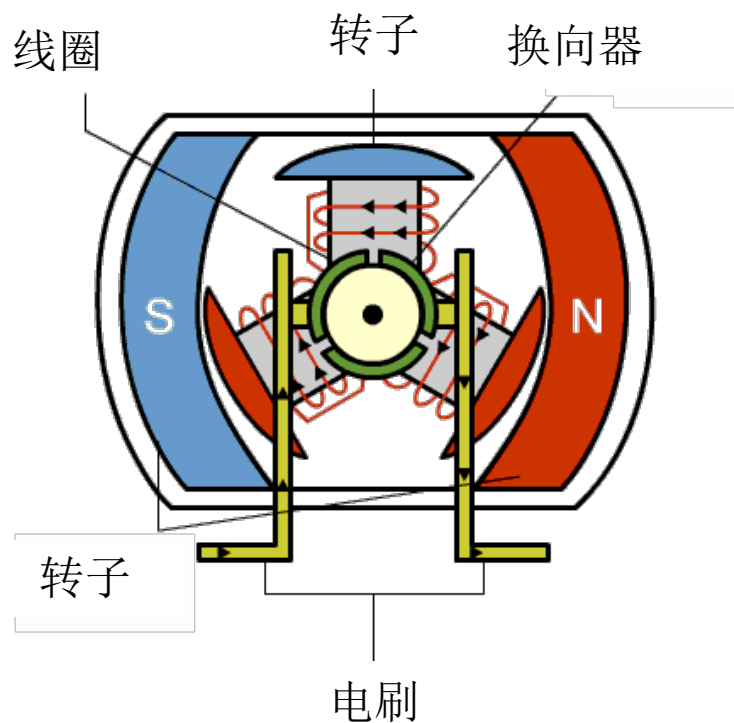
3. 动力系统

电机



(1) 功能

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。



有刷直流电机和无刷直流电机

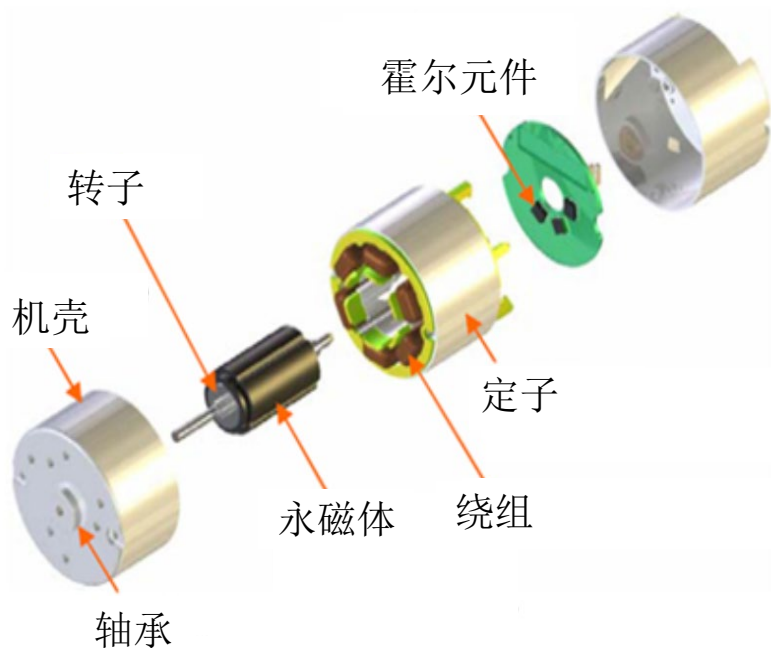
3. 动力系统

电机

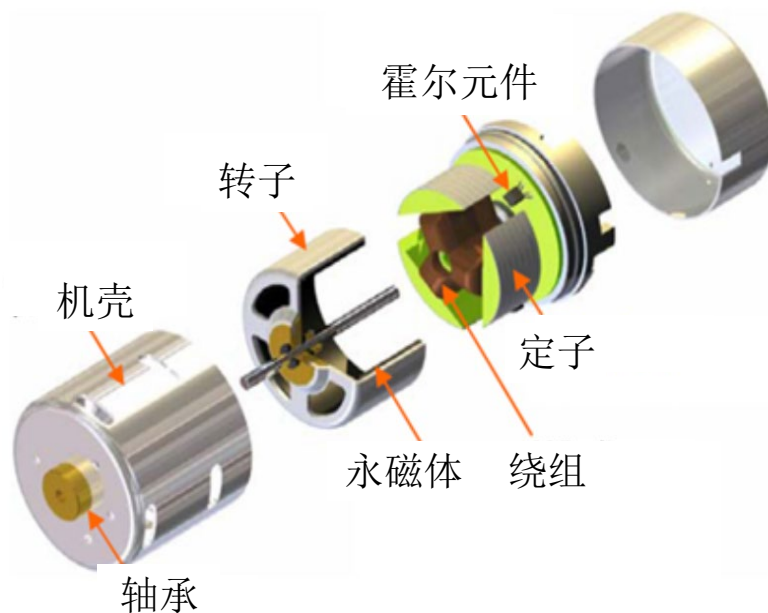


(1) 功能

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。

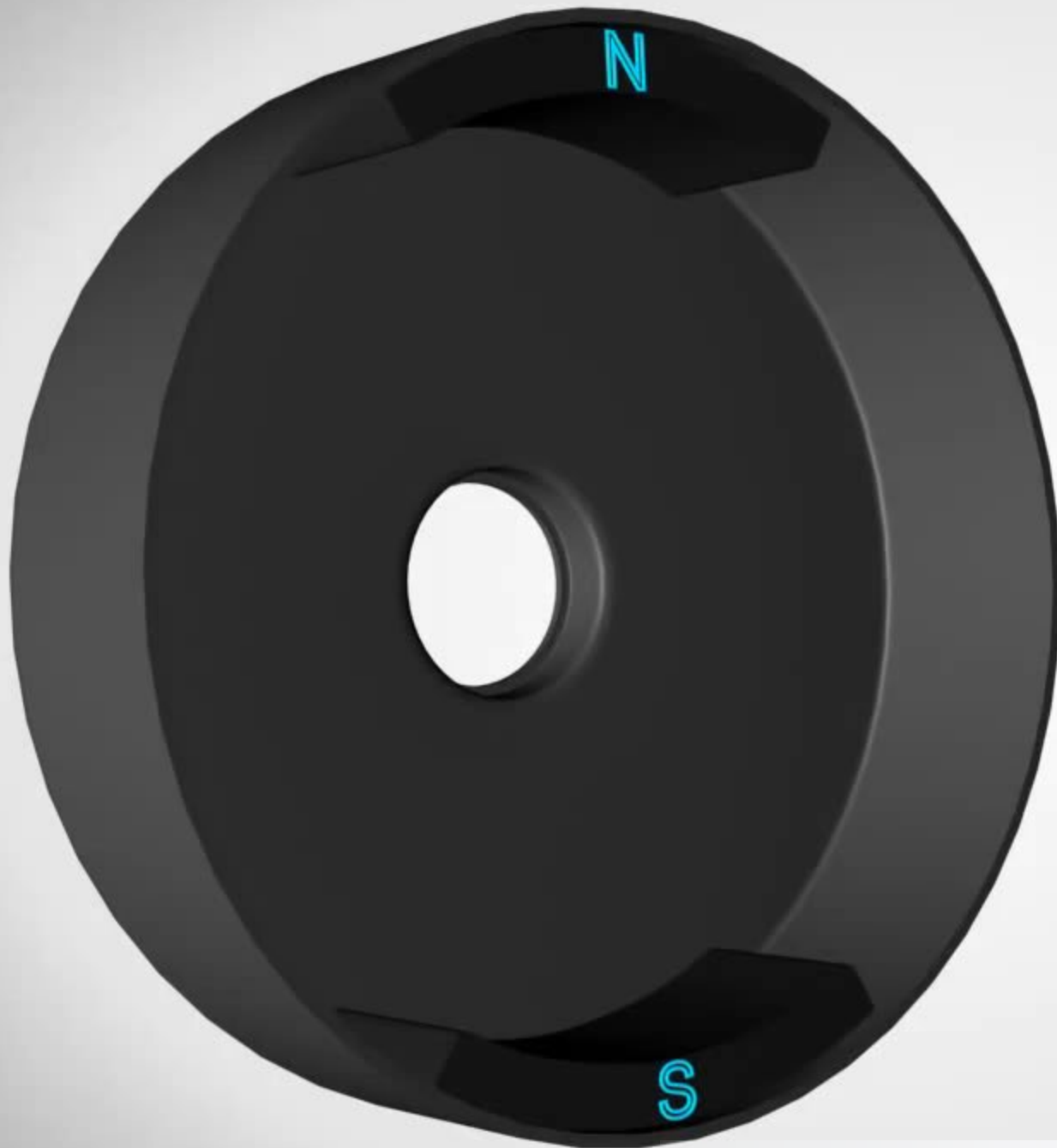


(a) 内转子电机



(b) 外转子电机

内转子电机和外转子电机，图片来源 www.nidec.com



ROTOR

3. 动力系统

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。

读者在选购或查看电机时需要仔细辨别，同时推荐结合厂商提供的电机尺寸图以便准确地确定电机尺寸大小。

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



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

电机能承受的**最大瞬时通过的电流/功率**。最大连续电流“**16A/180s**”代表电机最大可在16A的电流下连续安全工作最长约180s。最大功率定义类似。

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：

$$\text{总力效（单位：g/W）} = \frac{\text{螺旋桨拉力（单位：g）}}{\text{电功率（单位：W）}} = \text{螺旋桨力效} \times \text{电机功率}$$

3. 动力系统

电机



型号	桨	油门点	电压 (V)	转矩 (N*m)	拉力 (g)	电流 (A)	转速 (RPM)	输入功率 (W)	力效 (g/W)	电机温度
AIR2216 KV880	T-motor T1045	50%	16	0.07	435	3.5	6015	56	7.77	53.5℃
		55%	16	0.08	527	4.6	6620	73.6	7.16	
		60%	16	0.09	608	5.6	7113	89.6	6.79	
		65%	16	0.11	702	6.8	7563	108.8	6.45	
		75%	16	0.13	888	9.5	8545	152	5.84	
		85%	16	0.15	1076	12.3	9442	196.8	5.47	
		100%	16	0.18	1293	16.2	10464	259.2	4.99	

注意：电机温度为100%油门下电机运行10分钟的温度。
(以上数据均由2018款测试平台测得，不能与其它型号老数据做横向对比，仅供参考)

电机T-MOTOR AIR2216性能参数表

3. 动力系统

电机



(4) 电机的消磁特性

对于各种电机，内部的永磁体是驱动电机的关键所在。而无刷电机在负荷过高或者内部掉入杂物时会使温度急剧增高，**当温度达到 150°C 时**，永磁体会突然消磁，也就是说多旋翼会从空中突然失去动力，会很危险。因此要注意电机平常的维护，正常运行是不会达到这样的温度的。

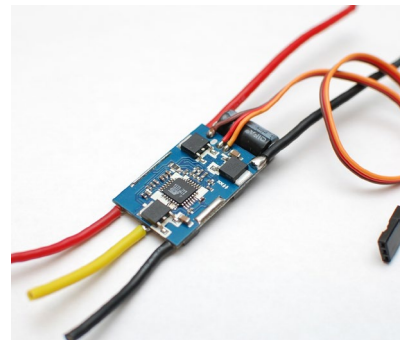
3. 动力系统

电调

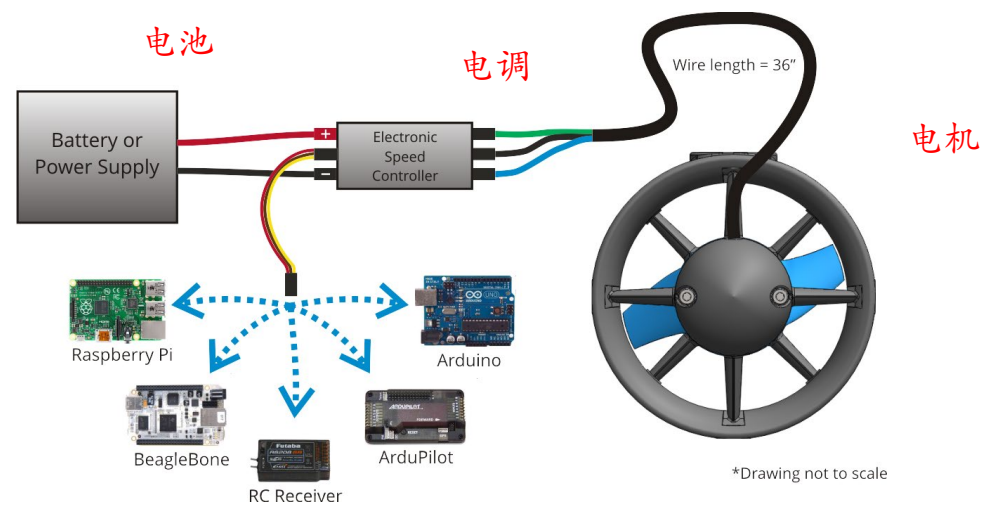
(1) 功能

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



电调实物图



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

3. 动力系统

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**。



3. 动力系统

电调



(2) 指标参数

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。

“3-4S LiPo”字样，表示这个电调可以承受的最大电压为4节电芯串联的锂聚合物电池的总电压，且**推荐**使用3~4节电芯串联的锂聚合物电池。

当电池电芯数量低于3节，电机效能会显著降低，因此并不推荐使用。

3) 内阻

电调都有内阻，由于通过电调的电流有时可以达到几十安培，电调的发热功率不能被忽视。按一般经验来说，电调的内阻一般为 $1\text{m}\Omega$ 到 $2\text{m}\Omega$ 之间，用户可以此为参考计算电调的发热功率，对于不同电调的具体内阻，**请咨询查看产品说明书或咨询厂家询问详情。**

3. 动力系统

电调



(2) 指标参数

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

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



好盈无刷电调参数编程卡

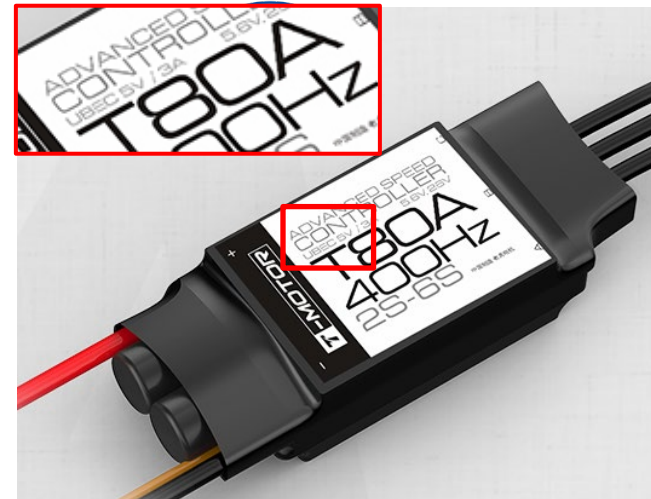
Programmable Items	Value								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Basic Items									
1. Running Mode	Forward with Brake	Forward/Reverse with Brake	Forward/Reverse (For Rock Crawler)						
2. Drag Brake Force	0%	5%	10%	20%	40%	60%	80%	100%	
3. Low Voltage Cut-Off Threshold	No-Protection	2.6V /Cell	2.6V /Cell	3.0V /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			

一张电调参数配置表

3. 动力系统

电调

(3) “BEC”和“UBEC”



- BEC大多采用**线性稳压方式**，其优点是线路简单、体积小，只要一个稳压管就可以；缺点是转换效率不高，稳压的时候**能量损耗大**（线性稳压效率一般只有65%~70%），所以在工作过程中稳压管会很烫。由于BEC效率不高,输出电流最大也就1A左右，因而无法满足大电流要求。
- UBEC（Ultra Battery Elimination Circuit）是针对BEC的缺点所开发出的体积更大、输出电流更强的稳压模块，以满足大功率舵机的需求。其改用**开关电源**的方式来稳压，转换效率高（做得好的甚至能达到98%），稳压过程损耗小，发热降低。开关电源虽然有诸多优点，但元件过多使它**体积偏大**，并产生**较强的电磁干扰**，所以UBEC的说明书上一般都会建议将UBEC放置在**离接收机或飞控系统较远的地方**。

3. 动力系统

电调



(4) 方波驱动 VS 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

电源



(1) 电池

1) 功能

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**优良的放电性能和便宜的价格优势。**



3. 动力系统

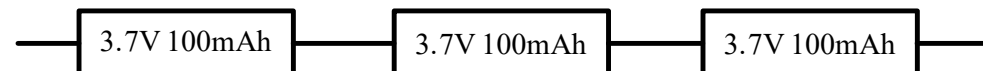
电源



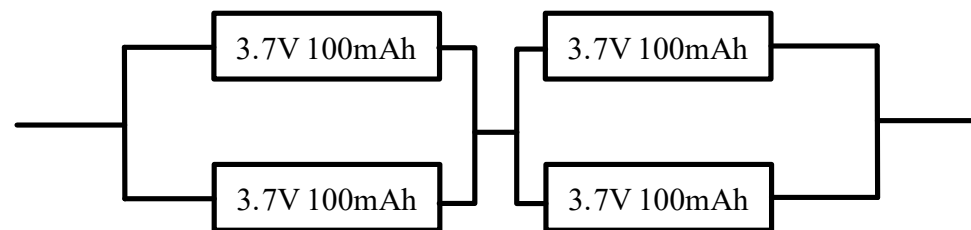
(1) 电池

2) 指标参数：电池连接

- 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。



(a) 3S1P (11.1V 100mAh)



(b) 2S2P (7.4V 200mAh)

3. 动力系统

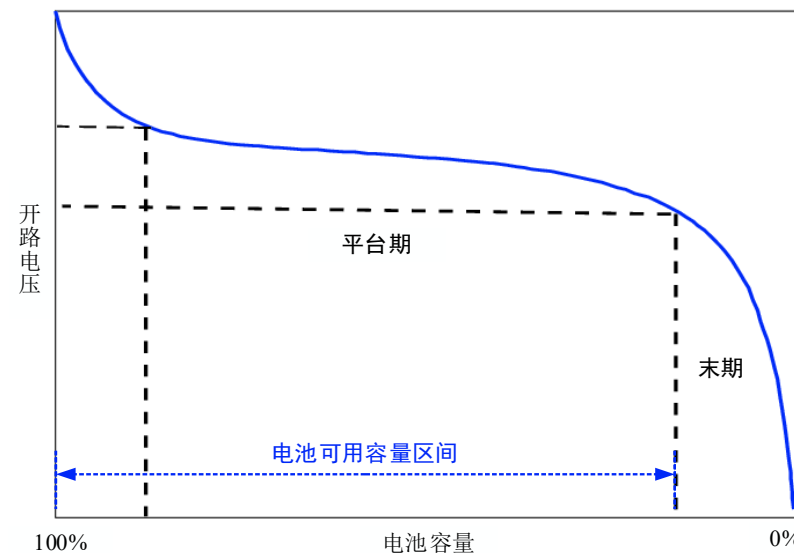
电源



(1) 电池

2) 指标参数：容量

- 电池的容量是用毫安时表示的。
- 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

电源



(1) 电池

2) 指标参数：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，越大标明放电越快。**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

电源



(1) 电池

2) 指标参数：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

电源



(1) 电池

2) 指标参数：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，单位瓦时每千克（Wh/kg）或瓦时每升（Wh/L）。
- 锂电池的**电池密度大致在240Wh/L到300Wh/L之间**（是镍镉电池的2倍，镍氢电池的1.5倍）。
- 能量密度更更高的电池是氢燃料电池，其是使用氢元素制造成存储能量的电池，对于目前常用的质子交换膜氢燃料电池。

氢燃料电池具有免充电、无火花、低噪声、无废弃物处理问题等优点。现在**燃料电池能量密度提高到1000Wh/kg比当前流行的锂离子电池能量密度150~300Wh/kg高出了许多。**

3. 动力系统

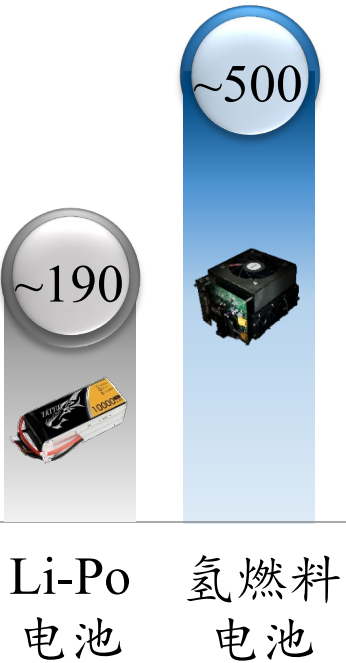
电源



(1) 电池

2) 指标参数：能量密度

主要特征比较分析			
			
分类	电池(现在)	锂电池(未来)	氢燃料电池(现在)
容量	100kWh	150kWh	2.6kW
能量密度	200Wh/kg	300Wh/kg	430Wh/kg
寿命	500 次	500 次('23) 1,000 次('28) 2,000 次('32)	10,000 次以上
重放时间	50% 充电 30分钟	20% 充电 5分钟	100% 加氢 5分钟以内



多旋翼无人机，垂直起降固定翼无人机及直升机，对比传统锂电池动力氢动力系统可以**提高3倍以上的续航时间**



3. 动力系统

电源



(1) 电池

3) 注意事项

- **电压确认**：确认设备的额定工作电压以及可承受的最高电压。
- **用后检查**：同时在使用后，应立马检查电池的发热情况，如电池异常发热应及时处理。电池插头、外包装也应定期例行检查。
- **长期存放**：尽量不要在满电状态下长时间搁置与存放，在充电完成后应尽快使用。对于短期内无使用需求或长期储存的锂电池，一般要求其为半电状态，长期存放的电池也要十天左右对电池进行一次电量补充。
- **保存事项**：锂电池应保存在防爆柜或防爆箱中，存放环境应避免高温和猛烈撞击。应使用绝缘材料将每块电池进行单独包装。
- **充电**：**绝对不可以**在无人值守的情况下对锂电池进行充放电。

3. 动力系统

电源



(2) 平衡充电器

为了保证每次充满电后电池组中每节电芯的电压都会在指定电压（3.7V或4.2V），必须使用使用锂电池平衡充电器。



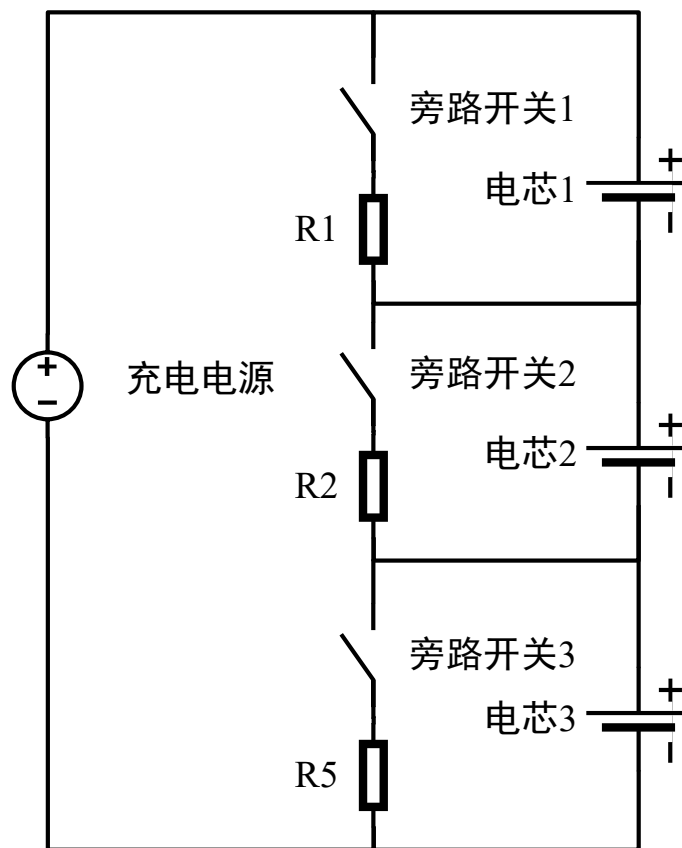
乐迪CB-86 PLUS平衡充电器

3. 动力系统

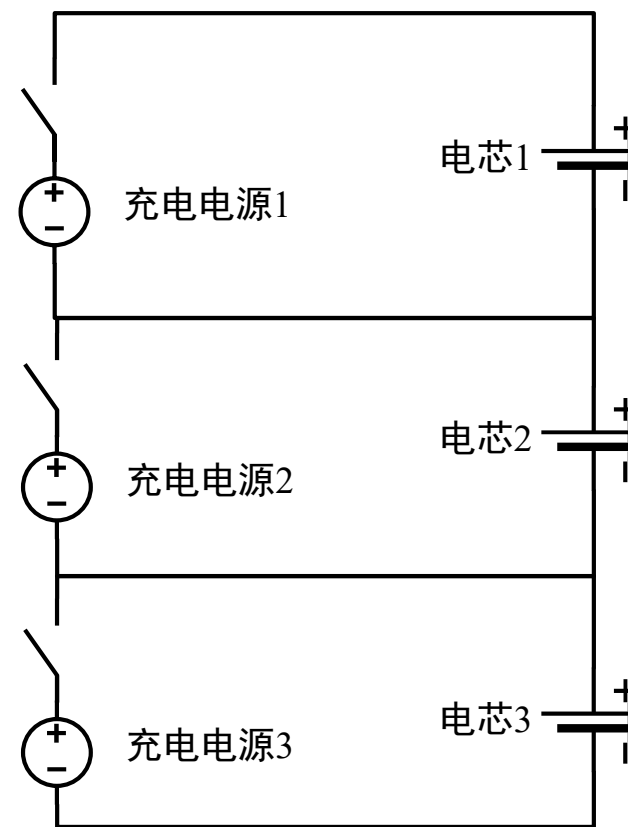
电源



(2) 平衡充电器



(a) 串联平衡充电电路



(b) 独立平衡充电电路

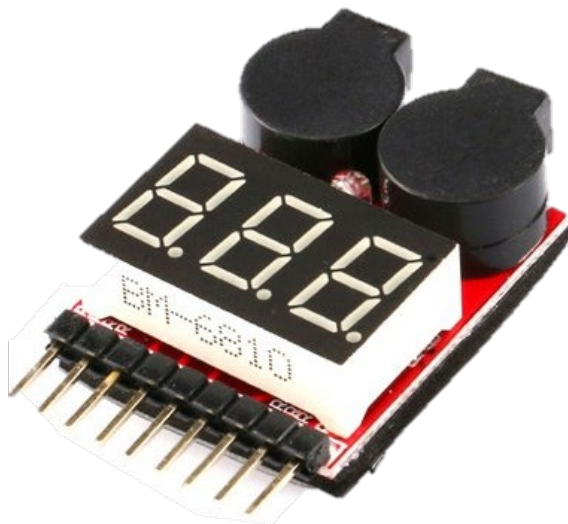
3. 动力系统

电源



(3) BB响

- BB 响的的主要功能可以概括为：**电压显示和低压报警。**
- 实时检测电池总电压与各个电芯的电压，并显示出来，并且在某一块电芯电压低于安全范围的时候发出“BB”的响声。
- 推荐将这种元器件与电池的平衡头相连，在飞行器运行的全过程中时刻检测电池电压。



3. 动力系统

电源

(4) 线材和接插件

1) 硅胶线



- 专用硅胶线有两个特点：一是纤芯每一股很细，但是有很多股缠绕，可以通过很大的电流，同时又保证线材比较柔软；二是线皮用硅橡胶，非常柔软，不过同时也很容易破损。
- 为了保证在飞行器连通电源的时候不至于将电源接反，我们通常使用红色硅胶线作为正极导线而黑色硅胶线作为负极导线。硅胶线的粗细使用AWG参数来描述的，**AWG越小，线径越大，允许通过的电流越大。**

3. 动力系统

电源



	股数/线径	铜丝直径	外皮外径	绝缘厚度	导体电阻	截面积	允载电流
6AWG	3200/0.08mm	5.2	8.5	135	1.21	16.08	300
8AWG	1650/0.08mm	4.4	6.3	1.2	4.1	8.29	190
10AWG	1050/0.08mm	2.92	5.5	5.28	6.3	5.3	140
12AWG	680/0.08mm	2.41	4.5	3.42	9.8	3.4	88.4
14AWG	400/0.08mm	1.85	3.5	2	15.6	2.07	55.6
16AWG	252/0.08mm	1.57	3.0	1.3	24.4	1.27	35
18AWG	150/0.08mm	1.13	2.3	0.75	39.5	0.75	22
20AWG	100/0.08mm	0.92	1.8	0.5	62.5	0.5	13.87
22AWG	60/0.08mm	0.72	1.7	0.3	88.6	0.33	8.73
24AWG	40/0.08mm	0.58	1.6	0.2	97.6	0.2	5
26AWG	30/0.08mm	0.44	1.5	0.15	123	0.14	3.5
28AWG	16/0.08mm	0.32	1.2	0.08	227.2	0.08	1.25
30AWG	11/0.08mm	0.3	0.8	0.055	331	0.06	0.8

3. 动力系统

电源

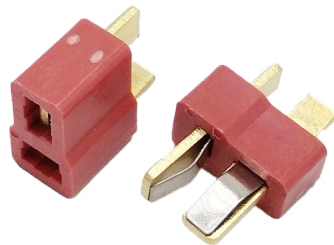
(4) 线材和接插件

2) T型头

如果飞行器所需的动力电电流很小，一般使用T型头。一般**电源上为母头**，而**电调上的为公头**。当公母头相连的时候，其中的簧片会被压紧，因此可以使得两部分导线紧密连接。

3) XT60

在**电流较大**的飞行器中，我们推荐使用XT60型连接器，如图(b)，这种连接器可以通过**60A以上**的电流。其内部是两个香蕉头，通过接头一周环绕的簧片，增加接触面积减少电阻。



(a) T型头



(b) XT60



3. 动力系统

电源

(4) 线材和接插件

4) AS150插头



- 允许通过的额定电流为70A，瞬时电流为150A，最高可承受500V直流电压，推荐使用6AWG硅胶线。
- 具有良好的**防打火设计**。
- 在AS150红色公插头顶端的电阻设计，通过限制电路接通初始的瞬时电流大小，来实现**防打火**的目的。在使用时应**先接黑插头，再接红插头**，同时要确保红插头插到底，以免公头顶端的电阻长时间通过大电流。



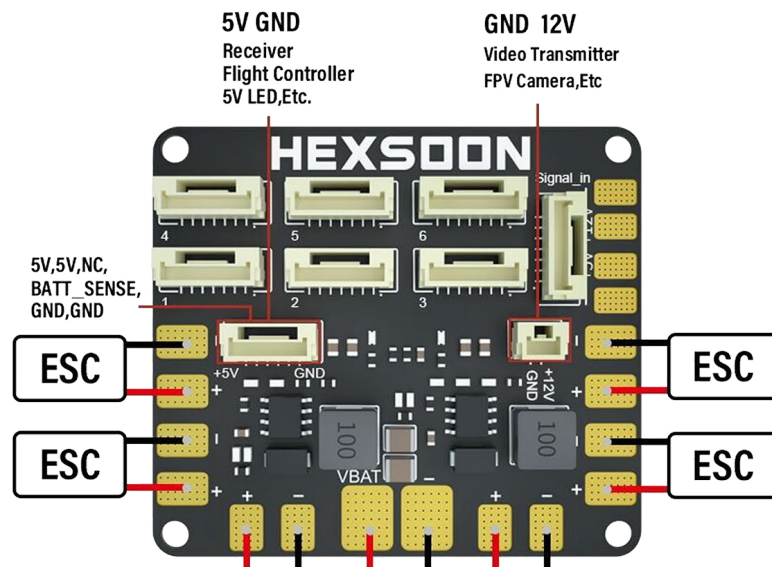
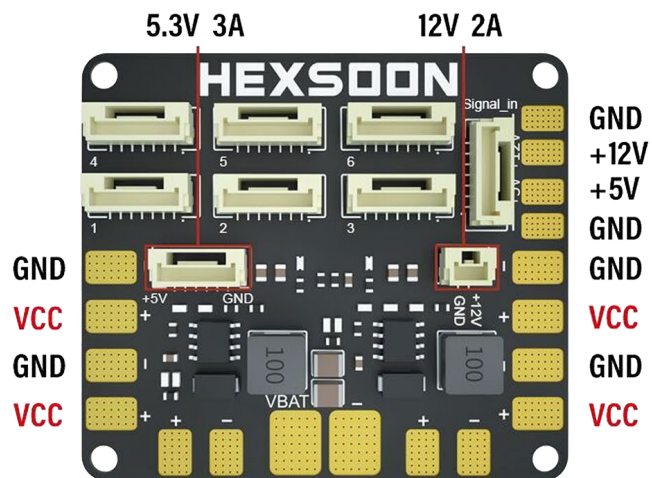
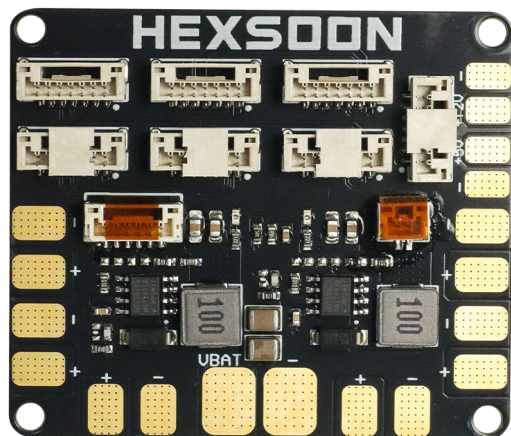
3. 动力系统

电源



(5) 电源分配板

- PDB（分电板）是Power Distribution Board或Printed Distribution Board的简称，具有将电池的电力**分配到多个ESC上**的功能，是一种由印制基板构成的部件。
- PDB就能通过**印制基板对电源进行分配**，解决走线布置麻烦的问题。基本上PDB在使用时只需要将ESC引出的电源线通过焊锡连接就可以了，也有点PDB上具有XT60等插头，可以直接插拔使用。



4. 通信系统

■ 通讯频率规范



为了强化无线电频率波段的管理，2015年工业和信息化部无线电管理局针对民用无人机使用特殊情况制定了《民用无人机系统频率使用事宜》规范文件，主要内容包包括以下三点：

- (1) 840.5~845MHz频段可用于无人机系统的上行遥控链路；
- (2) 1430~1446MHz频段可用于无人机系统下行遥测与信息传输链路；
- (3) 2408~2440MHz频段可以用于无人机系统下行链路，但无线电台工作时不得对其他合法无线电业务造成影响，也不能寻求无线电干扰保护。

2015至2017年，实际民用无人机工程应用中**GPS信号则采用标准的1.5GHz频率**，数据传输多使用2.4GHz频率，**图像数据传输多使用5.8GHz频率**。遥控器与接收机之间常用的无线电频率是**72MHz和2.4GHz**。

4. 通信系统

数传



(1) 跳频电台

最早的无线电传输设备只使用一个频率进行传输，一旦这个频率遭到干扰设备就会失灵，因此跳频技术被普遍采用。所谓跳频FHSS（Frequency-Hopping Spread Spectrum），**就是发射和接收端在通信过程中，如果当前频率信号强度下降，则按照规则一起更换频率的技术。**这样一个简单的技术使得数字通信质量得到了质的飞跃，通信距离提升，误码率下降。

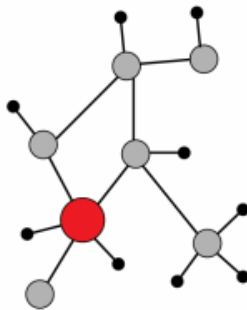


亿佰特（EBYTE）跳频电台技术设备

4. 通信系统

数传

(2) ZigBee电台



自由自组网



低功耗



- ZigBee协议已经是一种国际标准协议，编号IEEE802.15.4，是用于**低功耗局域网的通信协议**
- 虽然无人机领域使用ZigBee作为远距离数传已经有很长时间了，但是ZigBee协议自动组网中继最大特点却很少有人用到。它是第一种带有**自动组网功能**的无线通信协议，多个ZigBee设备就能够自动组成一张**局域网**，完成相互的通信与中继，扩大通信范围和距离

4. 通信系统

数传



(3) 4G网络

随着手机网络的发展，4G通信带宽和稳定程度已经可以用于低空民用无人机设备了。当前的4G网络对单个节点开放20K左右的带宽，正好够民用无人机使用，有些科研人员甚至开发低码率压缩算法使用4G网络传输图像。它的最大好处就是无限通信距离，缺陷就是只能在与地面相对高度200米以下的低空使用。依靠手机基站，可以在**全国不限距离**的控制无人机运行，并监视其状态，特别适合农业自动和无人机大数据平台化使用。**但是4G信号也存在信号强度不稳定，通信延迟很高的缺陷**，随着手机网络的不断发展，这些缺陷会慢慢改进。



4G 通信技术数据传输单元

4. 通信系统

数传



(4) 基于Lora的组网电台

- Lora是基于LPWAN协议开发的**低功耗远距离电台**（开阔地带大概支持10km远距离传输），用不需要申请许可的次GHz频段，
- **速率最高可以达到27Kbps，适合传输数据量比较小的测控信号。**

Lora定义了较低的物理层协议，没有定义上层的网络协议，开发者可以自行设计上层协议，如LoraWAN，是管理LPWAN网关和终端节点的类路由协议。由于Lora面向远程低功耗应用，而非像WiFi那样专门为家庭应用设计，在单网关接入的用户终端数量、链接可靠性、传输距离等方面有十倍上下优势，非常适合无人机等终端进行小规模组网应用。



若联科技Lora电台

4. 通信系统

图传



图传是用于传输图像信息的无线电设备，那么传输图像信息需要多大数据量呢？按照当前常见的1080P，分辨率来计算，

- 使用的MPEG4算法处理视频需要**10至15兆带宽**；
- 如果采用H.264算法处理视频，则需要**4至8兆带宽**；
- 如果使用最新的H.265算法则可以将带宽占用降低到**2至5兆**。

4. 通信系统

图传



(1) 模拟图传

模拟图传是最早广泛应用的图传类型，使用常规的无线电载波传输模拟信号。成本低廉，生产容易，大量用于娱乐产品。但是其一瓦一公里的传输距离和高功耗，容易干扰出现雪花^①的信号不稳定性，使得高清图像与之无缘。



模拟图传电台

4. 通信系统

图传



COFDM图传



使用WIDI协议的无人机专用图传



(2) 数字图传

可分为点对点数字图像传输和组网数字图像传输

- **点对点数字图像传输**是单一发射端向单一接收端传输图像、视频等信息，主要通过OFDM（即正交频分复用技术）、COFDM（即编码正交频分复用）、SDR（软件定义的无线电）等技术实现。
- **组网数字图像传输**是发射端和接收端不唯一，在组建的局域网内，其中一个节点既可以是发射端也可以是接收端，各节点之间可互相传输视频数据，共享信息。Wi-Fi 是一种民用短距离无线局域网协议，属于高带宽方案，

4. 通信系统

图传

(3) 图传典型应用：FPV飞行

当无人机飞出去100~200m或者中间有障碍物遮挡时，操控者就看不清它的飞行动作，也无法通过观察无人机姿态而进行控制，因此，给无人机装上一双“眼睛”——摄像头，通过摄像头来了解无人机前方环境，并随后的实时图像通过传输系统发送回地面，显示在地面上的显示器上，这就是**FPV（First Person View，第一人称视角）**飞行。

FPV飞行需要使用小型摄像头、图传和显示屏，将无人机操控者置身于所遥控驾驶的无人机虚拟驾驶员的位置上，体验第一人称视角飞行的乐趣，



DJI FPV飞行套装及穿戴示意图



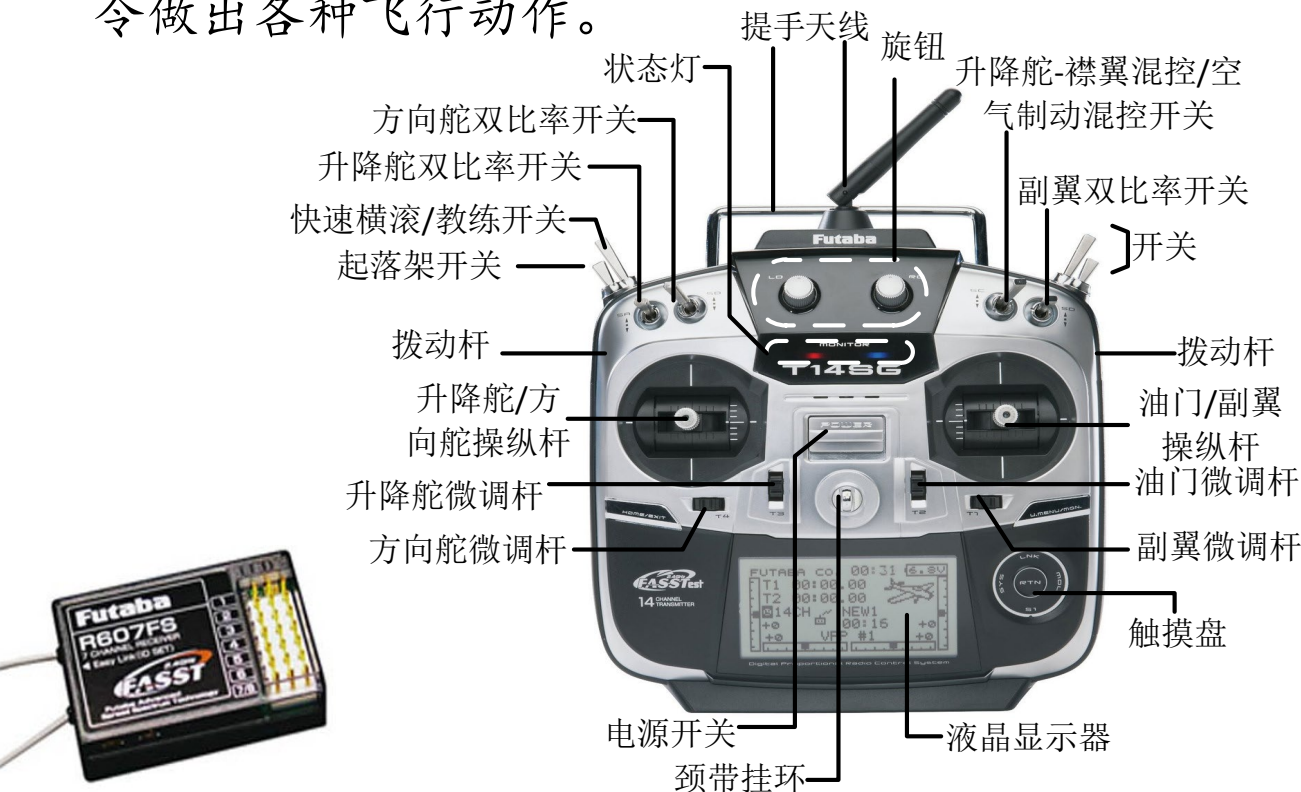
4. 通信系统

遥控器接收机



(1) 功能

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。



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

Futaba接收器

Futaba遥控器及定义

4. 通信系统

遥控器 and 接收机



(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. 通信系统

遥控器接收机



(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，即**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. 通信系统

遥控器 and 接收机



(2) 指标参数

3) 通道

一个通道对应一个独立的动作，一般有六通道和十通道。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、滚转所以少得4个通道遥控器。

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“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. 通信系统

遥控器接收机



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

4. 通信系统

遥控器 and 接收机



(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. 通信系统

天线



无线电天线承担着**发射和接收无线电信号的任务**，当它发射电磁波时有向某一个方向集中的特点，有水平方向的，也有垂直方向的，不同天线表现不同。根据天线电磁波发射特点大致可分为**全向天线**、**定向天线**两种。



(a) 鞭状天线



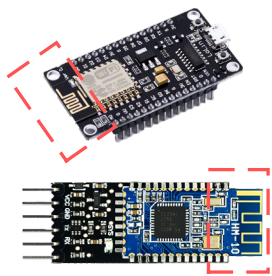
(b) 八木天线



(c) 抛物面天线



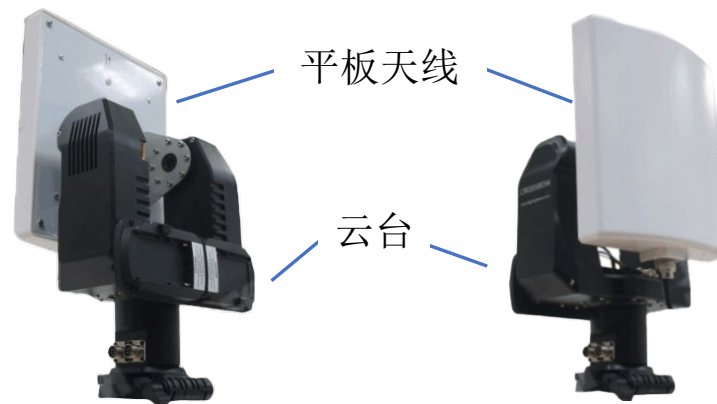
(d) 平板天线



(e) PCB印刷天线



(f) 陶瓷平板天线



平板天线

云台

4. 通信系统

■ 天线



- **(1) 全向天线**：能够向 360° 范围内发射较强的电磁波的天线，最为常见的是鞭状天线。电磁场**沿轴线方向强度最弱，垂直于轴线方向呈环形分布**，形似“苹果”或“甜甜圈”
- **(2) 定向天线**：明显的指向性，一般用于地面端，且安装在可以活动的平台上，使用高精度的伺服电机和角度传感器，通过地面控制站传来的飞行器实时数据，可以实时调整天线的朝向，让其始终对准目标。
- **一些特殊的天线**：**PCB印刷天线**，直接印刷在PCB上，其信号增益较小，一般用于WiFi、蓝牙等实现近距离传输通信。**陶瓷平板天线**，其内部采用单个或阵列式陶瓷天线，增强信号接收能力，并集成信号放大器用于过滤杂波并放大卫星信号，常用于小型无人机使用的一体化GPS中。

5. 指挥和控制系统

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）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) 气压计和超声波测量模块；
- 4) 微型计算机；
- 5) 接口。

5. 指挥和控制系统

■ 自驾仪



(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。
- 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。
- 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。

5. 指挥和控制系统

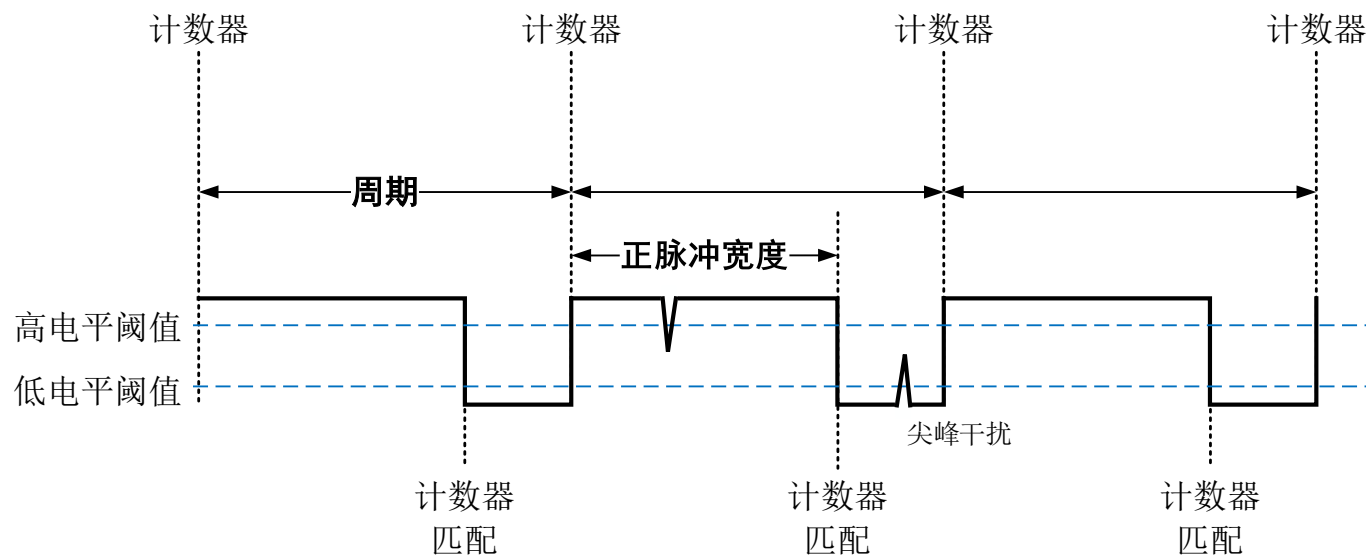
自动驾驶仪



(3) 控制信号

1) PWM信号

Pulse Width Modulation的缩写，**脉宽调制**，在飞控中主要用于舵机和电调的控制。该信号主要原理是通过**周期性跳变的高低电平组成方波**，来进行连续数据的输出。而飞控中常用的PWM信号，只使用了它的一部分功能，只用到**高电平的宽度**来进行信号的通信，而固定了周期，忽略了占空比参数。



5. 指挥和控制系统

自动驾驶仪



(3) 控制信号

1) PWM信号

- **跳变条件的存在**使得信号中即便存在一定的干扰，执行器可以准确识别原始信号；
- 脉宽的调节是连续的，使得它能够**传输模拟信号**；
- PWM 信号的发生和采集都非常简单，现在的数字电路则使用计数的方法产生和采集 PWM 信号；
- **信号值与电压无关**，这在电压不恒定的条件下非常有用。

5. 指挥和控制系统

■ 自驾仪



PWM实验视频插入

5. 指挥和控制系统

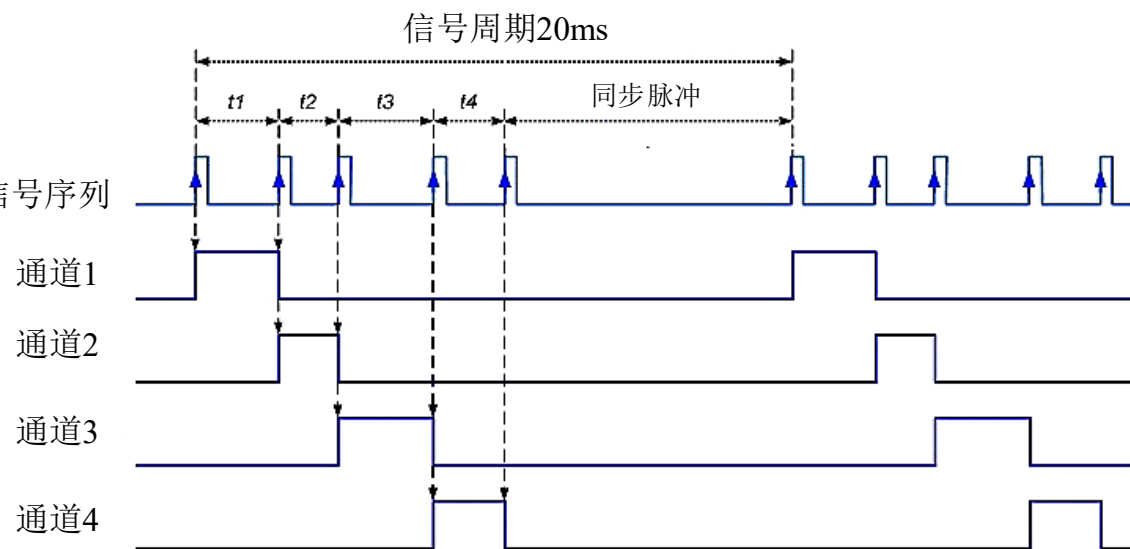
■ 自驾仪



(3) 控制信号

2) PPM信号

PPM是Pulse Position Modulation的缩写，PPM信号序列英文意思是脉冲位置调制。在上个世纪，航模领域中主要使用这种信号作为遥控器的主要无线通信协议，后来被用于教练线和模拟器。该信号使用多个脉冲作为一组，并以组为单位周期性发送，通过组内各个脉冲之间的宽度来传输相应通道的舵机控制信息。



PPM 控制信号时序图

5. 指挥和控制系统

■ 自驾仪



(3) 控制信号

3) S.BUS信号

S.BUS是Serial Bus的缩写，即串行总线。该总线是日本Futaba公司自己使用的专用总线协议。该协议有两个特点：一个是数字化，一个是总线化。

数字化是指的该协议使用现有数字通信接口作为通信的硬件协议，使用专用的软件协议，这使得该设备非常适合在单片机系统中使用。另外在其硬件协议中使用了数据校验增加抗干扰能力。

总线化指的是一个数字接口可以连接多个设备，这些设备（主要是舵机和电调）通过Hub与一个S.BUS总线连接，并能够得到各自的控制信息。

5. 指挥和控制系统

■ 自驾仪

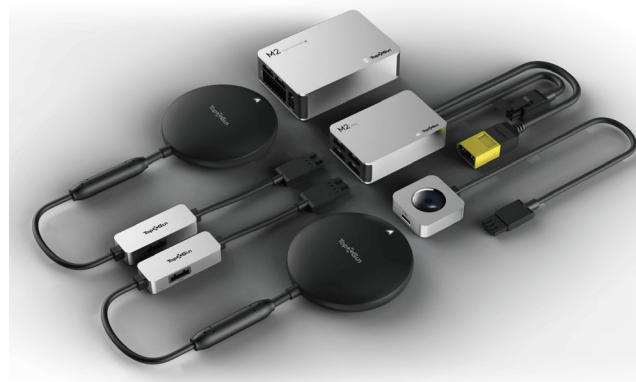
(4) 分类

1) 闭源自驾仪

- 闭源自驾仪一般由公司或者团队所开发，具有封闭的硬件及软件，整个系统会更加的完整，包括各种专用的传感器模块。会针对软件使用进行简单化设计提高用户体验，因此同时会带来更高的成本。常见的有大疆、拓攻、极飞、极翼等。
- 装配简单，软件优化全面，但开发成本高，系统局限性强。



(a)大疆A3系列自驾仪



(c)拓攻M2自驾仪



(c)极翼科技K3-A Pro自驾仪

5. 指挥和控制系统

自驾仪

(4) 分类

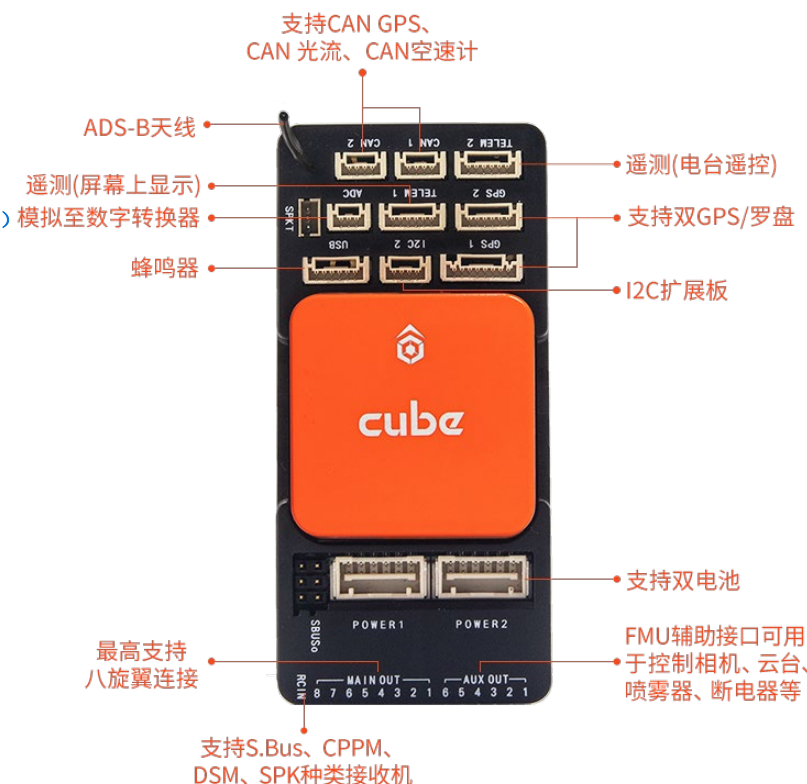
2) 开源自驾仪

开源自驾仪包含硬件和软件（固件）两部分。硬件部分，目前最常用的开源自驾仪硬件为Pixhawk。

Pixhawk采用了ST先进的168MHz Cortex M4核心处理器，搭载了NuttX实时系统，内置了三轴加速度传感器、三轴陀螺仪、三轴磁力计以及气压计，同时具有UART、SPI、CAN、I2C等丰富的通讯接口。



(a) 某Pixhawk 4 硬件接口



(b) 赫星橙色CubePilot飞控硬件接口

5. 指挥和控制系统

■ 自驾仪



(4) 分类

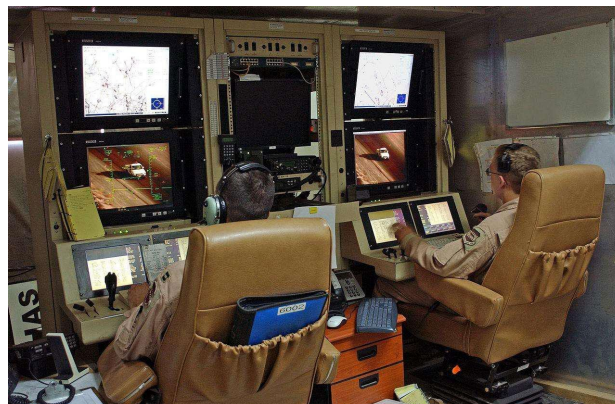
2) 开源自驾仪

- **PX4是Pixhawk的原生开源固件**，专门为Pixhawk开发使用，并与地面控制站在一起组成一个完全独立的自动驾驶系统。PX4固件主要特点包括：可控制许多不同的设备机架/类型，包括：飞机（多旋翼，固定翼和垂直起降），地面车辆和水下潜航器。适用于设备控制器，传感器和其他外围设备的硬件选择。灵活而强大的飞行模式和安全功能。
- **Ardupilot Mega (APM)** 是早在2007年由DIY无人机社区（DIY Drones）推出的飞控产品，最开始是基于Arduino的开源平台，那时候的处理器还是AVR系列的Mega2560，性能没有现在这么强大。但是随着APM飞控软件的快速发展，AVR的板子性能已经不能满足需求，因此在2013-2014年间APM开始逐渐脱离Arduino Atmel微处理器架构，尝试在其它平台和操作系统中运行，并最终Pixhawk的硬件架构上来进得以实现。

5. 指挥和控制系统

地面站

军用无人机的地面站一般如右图所示，其对飞行器的飞行有很大的帮助，它的出现使飞行器可以完成很难完成的任务。通过地面站，无人机飞行员在远离战场的基地里操作台的电脑屏幕，就能看到无人机在距离地面数千英尺高空拍摄的战场即时画面，甚至可以操纵无人机对目标进行打击，可以说地面站软件使无人机的能力大大增加了。



模块化方舱式地面站系统
“捕食者”无人机地面控制站



小型化地面站系统
国内某无人机地面控制站



单兵便携式地面站
黑蜂无人机地面控制站



信息一体化地面系统
MQ-1C“灰鹰”无人机的地面站

5. 指挥和控制系统

地面站

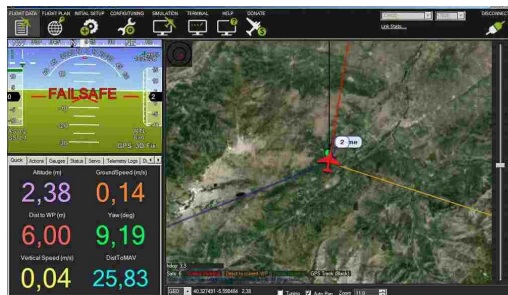
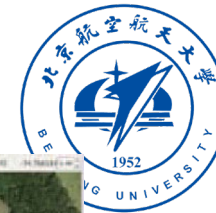


- **交互操作**：操作员可以用鼠标、键盘、按钮和操控手柄等外设来通过地面站软件与多旋翼自驾仪进行交互，如设置航点，规划航线，如果飞行器装了电台的话地面站还可实行与飞行器的实时通讯。
- **升级调参**：同时地面站软件可以对飞行器的飞控进行固件升级，调节其PID参数，对与飞控上的传感器如超声波传感器等进行校准和参数设置，地面站还可设置遥控器，校准遥控器各个通道。
- **记录回放**：任务完成后还可以对任务的执行记录进行回放分析。

目前世界上存在着不少开源地面站软件项目可供免费参考和使用。，目前最常用的两款地面站为QGroundControl（QGC）和Mission Planner。

5. 指挥和控制系统

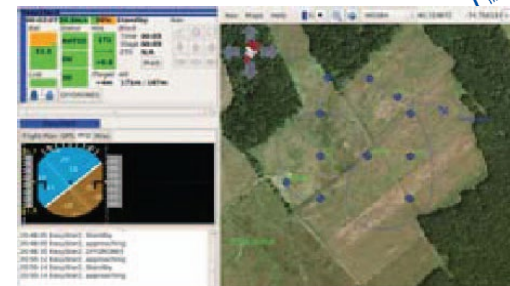
地面站



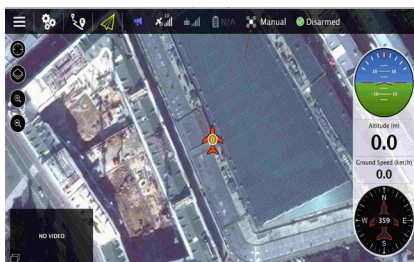
(a) MissionPlanner (Ardupilot)



(b) Openpilot



(c) Paparazzi



(d) QGroundControl (PX4)



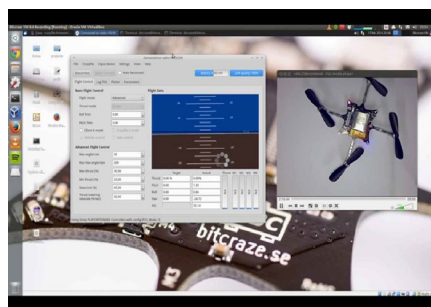
(e) Mikrokopter



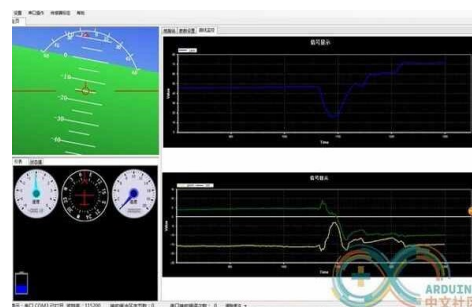
(f) Multiwii



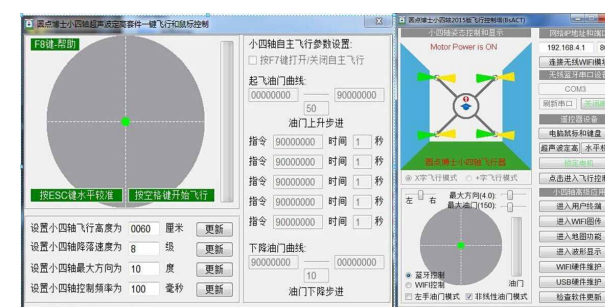
(g) Aeroquad



(h) Crazyflie



(i) CrazePony



(j) D.R R&D

部分开源地面站软件截图

5. 指挥和控制系统

地面站

(2) 功能

结合Mission Planner

1.3.74版本，简要介绍一下
地面站一些常用的基本功能。

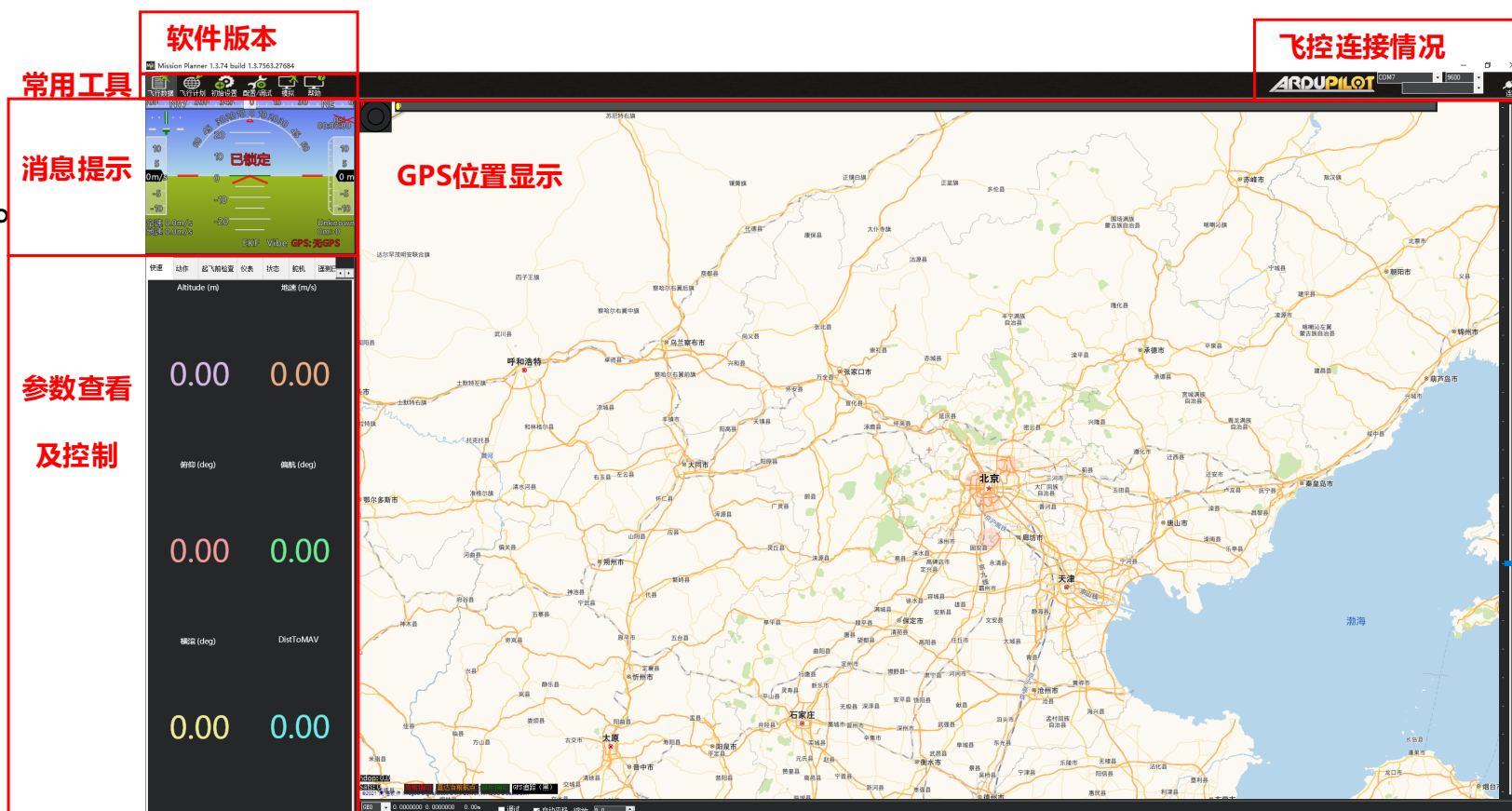
主界面中包括了软件版本显示、**飞控连接情况**、**常用工具集合**、**消息提示**、**参数查看及控制**、**GPS位置显示**等一系列常用功能模块。



(a) 未连接飞控



(c) 飞控连接成功



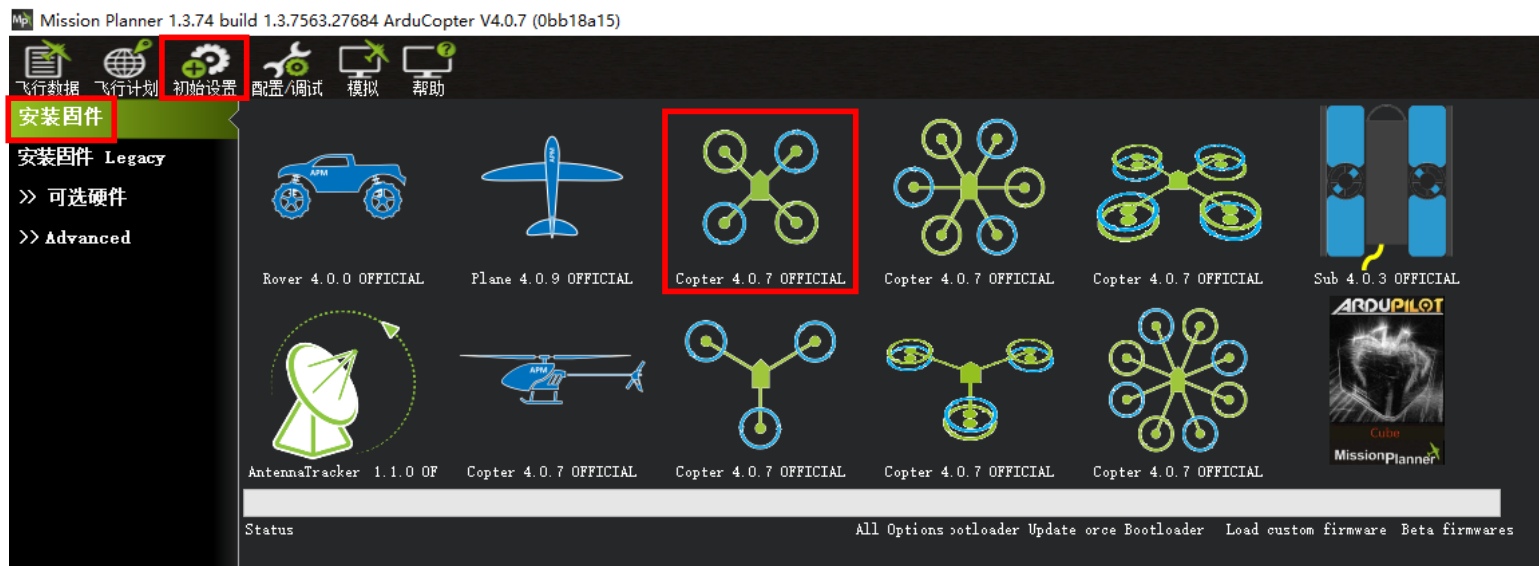
5. 指挥和控制系统

地面站



(2) 功能

在主界面软件标题栏下的常用工具中，若当前软件未连接飞控时，可以通过“初始设置”对飞控烧录固件，除四旋翼外，用户还可烧录**直升机、三旋翼、六旋翼等常见机型的官方固件**。

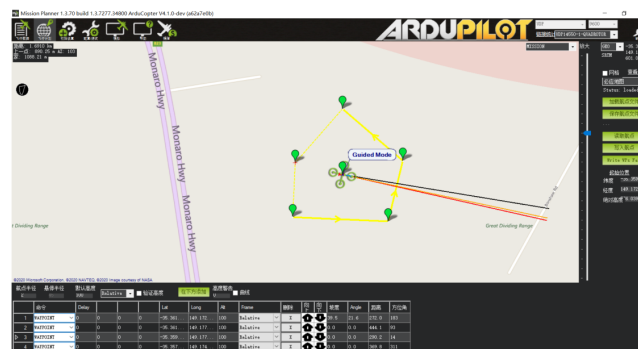


5. 指挥和控制系统

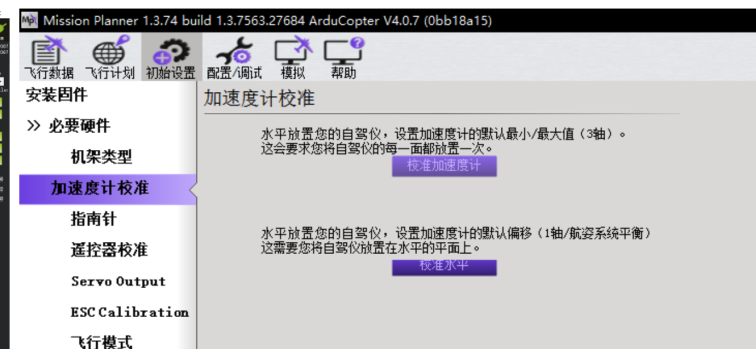
地面站

(2) 功能

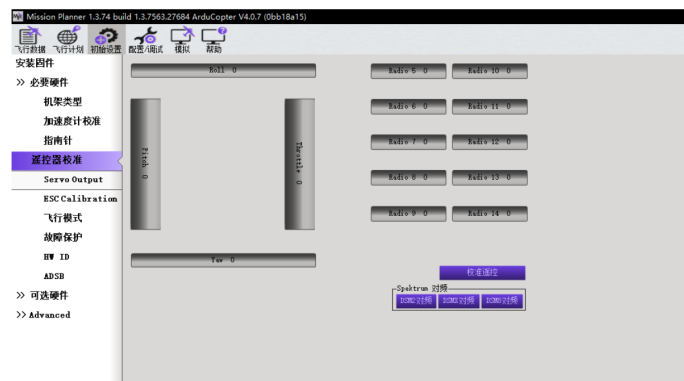
在软件与飞控建立连接之后，通过工具“飞行计划”可以在地面站中进行航点规划并下载指令到飞控中，通过“初始设置”可以进行加速度计、陀螺仪、磁力计等传感器以及电调、遥控器等设备的校准，通过“配置/调试”可以对飞控中PID控制器参数进行调试。



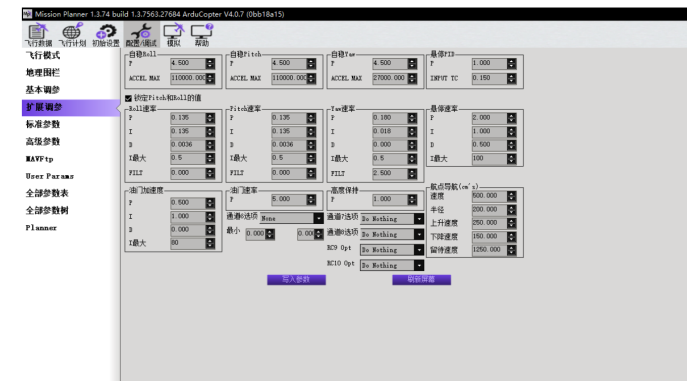
(a) 航点规划



(b) 传感器校准



(c) 遥控器校准



(d) 基本调参

5. 指挥和控制系统

地面站

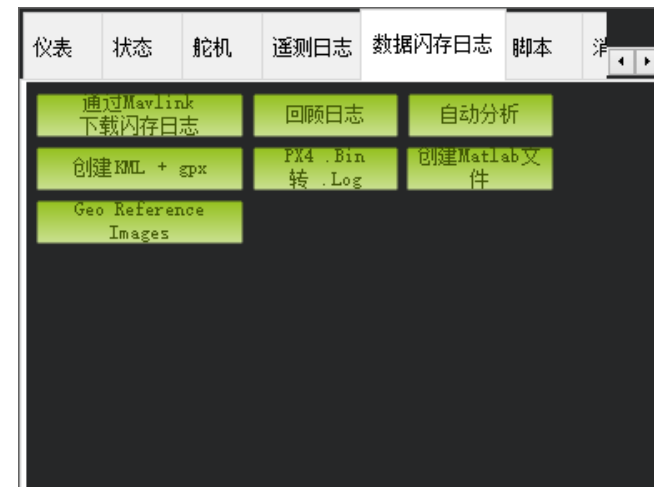


(2) 功能

- 在“参数查看及控制”的标签集合中，默认“快速”主要显示了飞控中**传感器详细的数据信息**；
- 其它标签如“动作”标签中，可以设置飞行器**飞行模式、设置返航、原始传感器数据查看、锁定/解锁**等操作；
- 在“数据闪存日志”标签中，可以进行下载、回顾、分析**飞行日志**等常用操作。



(a) “动作”标签页



(b) “数据闪存日志”标签页

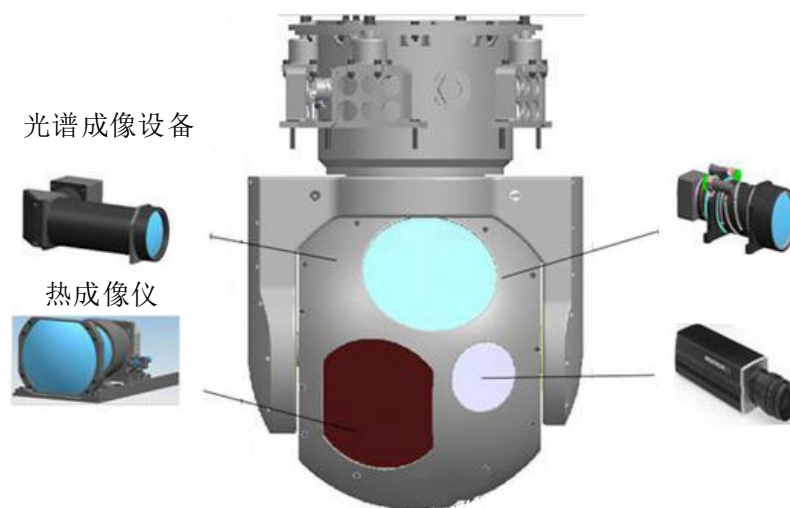
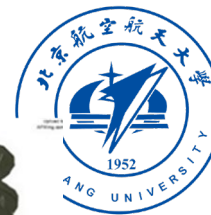
6. 载荷系统

吊舱和云台

(1) 吊舱

吊舱是最早出现在无人机上的视频稳定平台，至今仍是最复杂的无人机机载设备之一。

常见的吊舱有两个转动方向，分为双框架和四框架形式。双框架吊舱成本相对低廉，体积和重量也能够适合小型和中型无人机使用，但是稳定效果远远不如四框架吊舱。中大型无人机机载吊舱大多使用四框架，依然是两个自由度，但是每个自由度都有两组框架控制，相互配合使吊舱能够进行超远距离的稳定侦察。框架一般都由步进电机驱动，使用码盘进行精确的位置反馈。



6. 载荷系统

吊舱和云台



(2) 云台

云台是在多旋翼无人机主体上安装、固定运动相机、摄像机的支撑、控制设备。多旋翼无人机常常需要携带相机、摄像机进行飞行，遇到风时，多旋翼无人机很容易受到风的干扰，产生晃动，而云台则在此时帮助相机、摄像机等保持平稳。目前无人机上普遍使用无刷电机云台（每个转轴上加装一个专用无刷直流电机），通过无刷电机的伺服来调节相机、摄像机的稳定。



DJI 禅思 Zenmuse Z30 云台



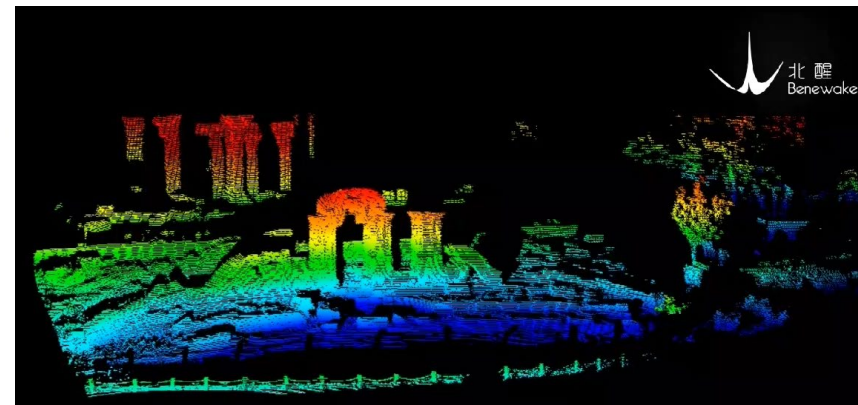
6. 载荷系统

激光雷达

激光雷达是一种以激光为发射源，可以精确、快速获取**目标三维空间信息**的主动探测技术。通过将激光扫描系统、卫星定位系统和惯性导航系统的结合，激光雷达技术可获得目标的三维立体图像，并具有快速、高效和精准的显著优势，被广泛应用于军事、航空航天以及民用三维传感等领域。



(a)北醒光子公司的Horn-X2 长距3D激光雷达



(b)激光雷达三维点云图

LiDAR
Light Detection and Ranging

6. 载荷系统

激光雷达



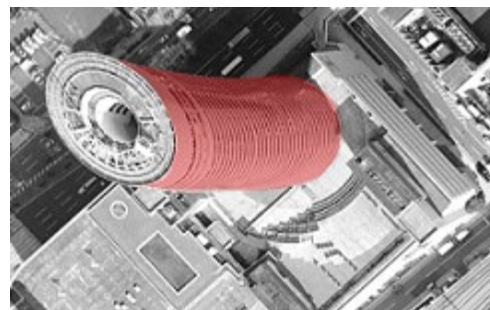
与普通微波雷达相比，激光雷达技术具有以下优点：

- **可以获得极高的角度、距离和速度分辨率**，因此可以利用距离-多谱勒成像技术来获得目标的清晰图像；
- **隐蔽性好、抗有源干扰能力强，激光具有直线传播、单色性好、方向性强、光束窄等特点，只有在其传播路径上才能接收到**，因此敌方截获非常困难，不易受激光干扰信号影响；低空探测性能好，相较于微波雷达的低空探测盲区，激光雷达对只有被照射的目标才会产生反射，不存在地物回波的影响；
- **体积小、质量轻**，通常普通微波雷达的体积庞大，整套系统质量数以吨记，而激光雷达发射望远镜的口径一般只有厘米级，整套系统的质量最小的只有几百克，这也使得机载、车载激光雷达具有广阔的应用前景。

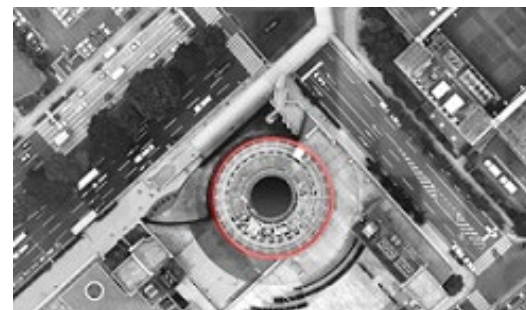
6. 载荷系统

正摄影与倾斜摄影

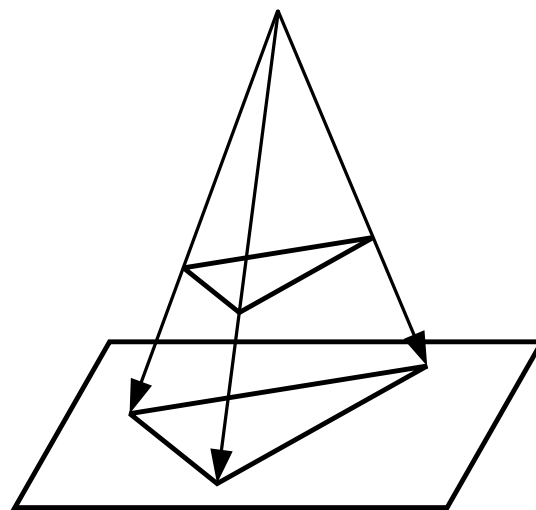
航空摄影测量在测绘领域属于一个比较“古老”的成熟技术，它解决了测绘领域内快速获取大范围数据的问题。传统航空摄影测量使用的专用航摄仪重量大、造价高，而且使用的飞行平台是载人飞机，所以相对航高较高，无法进行更高精度的地形图测绘。近年来快速发展的无人机技术为测绘领域数据的快速获取打开了新的**大门**，**不仅受空域限制小，从策划到实施速度快，还因为飞行高度低，有希望实现更高精度的地形测绘。**



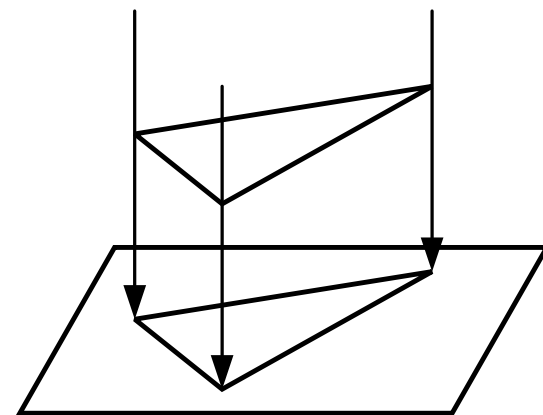
(a) 正摄影像图



(b) 真正摄影像图



(c) 中心投影



(b) 正平行投影

6. 载荷系统

正摄摄影与倾斜摄影

倾斜摄影技术是国际摄影测量领域近十几年发展起来的一项高新技术，该技术**通过从一个垂直、四个倾斜，五个不同的视角同步采集影像，获取到丰富的建筑物顶面及侧视的高分辨率纹理。**

使用了摄影测量原理，增加了如图所示拍摄建筑物立面的相机，这样建筑物的立面信息也可以被完整的采集下来，以供建模使用。多个方向对相同地物做采集和补充。同样倾斜模型在三维空间里同样具有可量测性。基于三维模型，各种行业应用比如日照分析、通视分析、水淹分析等等都会有更加直观的感受



成都睿铂高精度倾斜摄影镜头



倾斜摄影成像

(1) 多旋翼五大系统:

- 机架
- 动力系统
- 通信系统
- 指挥和控制系统（导航模块、控制模块、决策模块）
- 载荷系统

(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。

1. 在网上搜索一款多旋翼产品，给出其机架、螺旋桨、电调、电机、电池、遥控器和 GPS 系统的关键参数。
2. 给出一种检测螺旋桨动平衡的方法。
3. 解释正弦波驱动的工作原理。
4. 任意对比两款开源自驾仪，说明它们的优点和缺点。
5. 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，并给出相关型号与链接，分析其飞行原理、优点和缺陷。
6. 介绍一种新的多旋翼载荷。



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

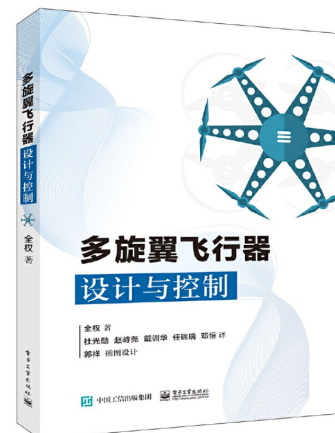


多旋翼飞行器

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

