



---

# 多旋翼飞行器设计与控制 实践

## 第五讲 动力系统设计实验

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



北航可靠飞行控制研究组

BUAA Reliable Flight Control Group



# 大纲

---

1. 基本原理
2. 基础实验
3. 分析实验
4. 设计实验
5. 小结





# 基本原理

## 动力系统



图. 多旋翼动力系统

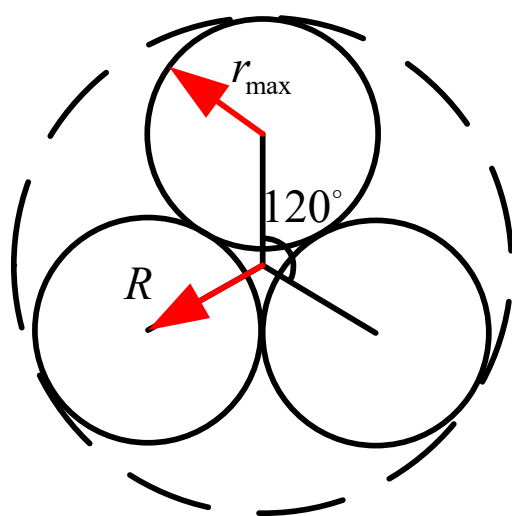




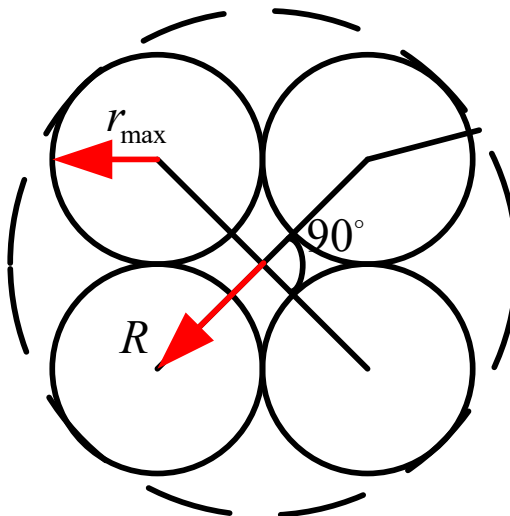
# 基本原理

机体半径 $R$ 与旋翼最大半径 $r_{\max}$ 存在如下关系( $n_r$ 表示多旋翼机臂个数)

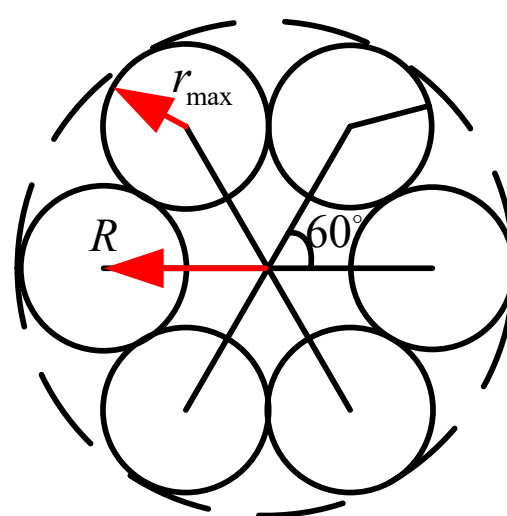
$$R = r_{\max} / \sin \frac{180^\circ}{n_r}$$



(a) Y6六旋翼 (共轴双桨)



(b) 传统四旋翼



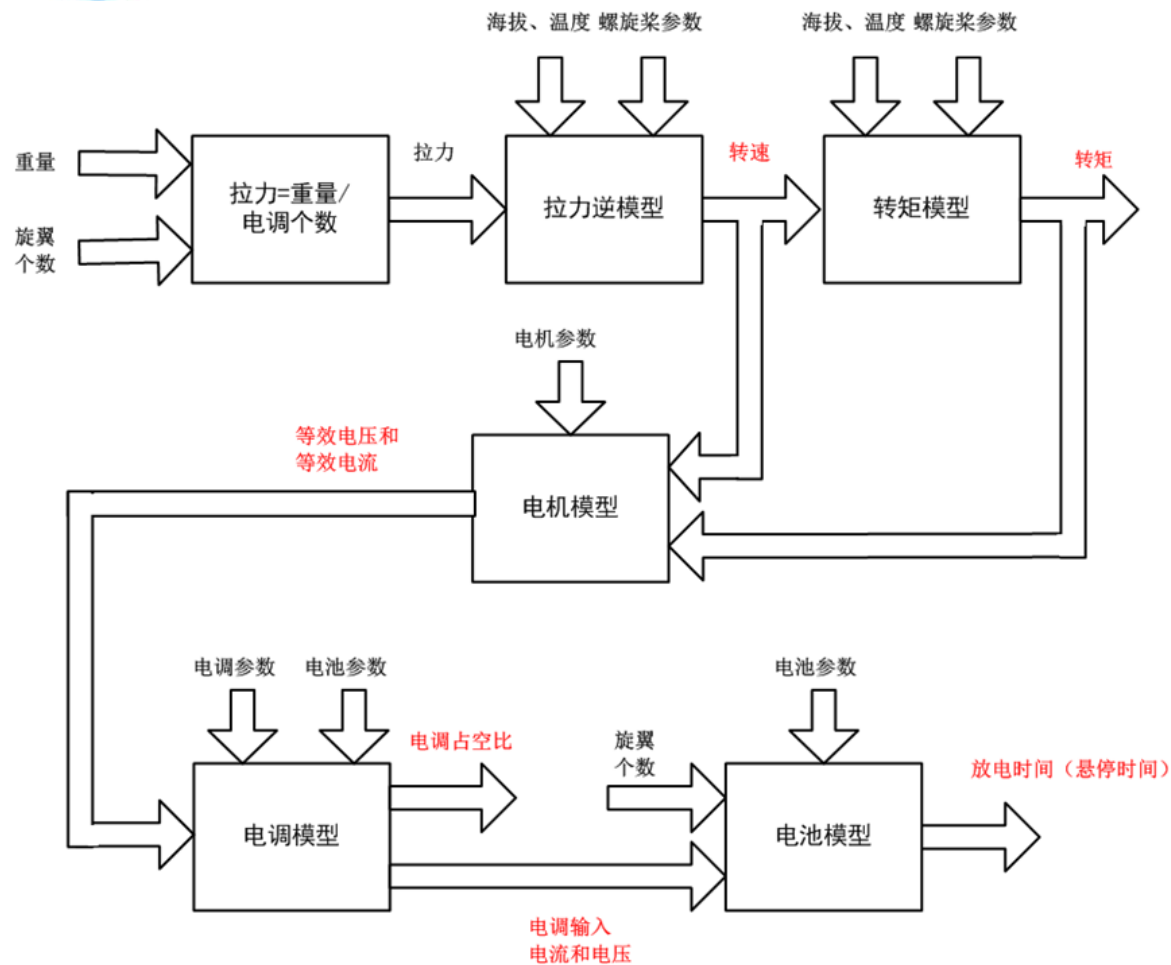
(c) 传统六旋翼

图. 多旋翼机体半径与最大旋翼半径示意图





# 基本原理



- 螺旋桨模型：拉力和转矩
- 电机模型
- 电调模型
- 电池模型

图. 求解悬停时间的总体思路



# 基本原理

---

以上原理可以详细参考“Quan Quan. *Introduction to Multicopter Design and Control*. Springer, Singapore, 2017”或者“全权著. 杜光勋、赵峙尧、戴训华、任锦瑞、邓恒译。《多旋翼飞行器设计与控制》，电子工业出版社，2018.”的第4章。





# 基础实验

## □ 实验目标

### ■ 已知

多旋翼飞行评估网站: <https://flyeval.com/paper/>

Dongjie Shi, Xunhua Dai, Xiaowei Zhang, and Quan Quan. A Practical Performance Evaluation Method for Electric Multicopters. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2017, 22(3):1337-1348.

### ■ 目标

目标在海拔0m, 温度25° C, 用网站适配出飞行大于10分钟的三旋翼、三轴六旋翼、四旋翼、六旋翼、四轴八旋翼和八旋翼各一架, 分依据多旋翼飞行评估网站列出该飞行器的所有飞行参数及基本飞行性能参数。

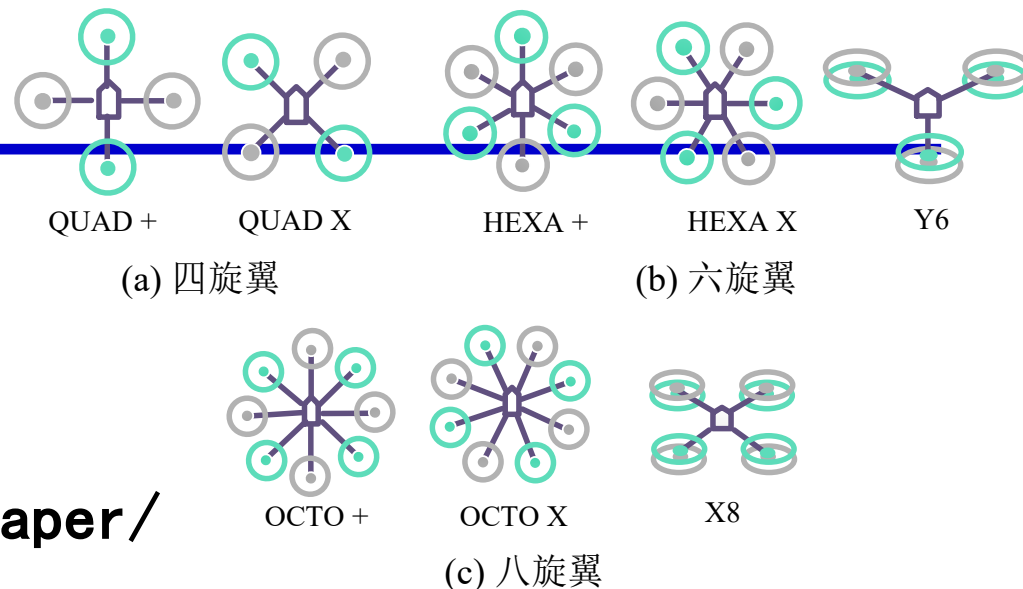


图. 不同的多旋翼





# 基础实验

## □ 实验步骤

(1) 如下图所示，选择机型，以三旋翼为例：“整机重量”设置为1.0kg，“机架轴距”设置为450mm，“飞行海拔”设置为0m，“空气温度”设置为25℃，“外形气动”选择默认值“一般”。第二行参数设置为默认值。

	整机重量 (t) 1.0 kg	机架轴距 450 mm	飞行海拔 0 m	空气温度 25 °C	外形气动 一般 ▼
	电池放电下限 15% ▼	安全起飞油门上限 85% ▼	飞控最大倾角 无限制 ▼	飞控&附件电流 0.5 A	

图. 基本参数配置





# 基础实验

## □ 实验步骤

(2) 如下图所示，选择电机，螺旋桨，电调和电池。




	电机品牌: DJI (大疆) ▼	型号: 2212 KV920 ▼	
	螺旋桨品牌: DJI (大疆) ▼	型号: CFP 10x3.8 ▼	
	电调品牌: *常用... ▼	型号: max 30A ▼	
	电池品牌: *常用... ▼	型号: LiPo 1S-3.7V-25/35C-3000mAh ▼	电芯串并联结构: 3 ▼ S 1 ▼ P
<div>计算！</div>			

图. 动力系统参数配置





# 基础实验

## □ 实验步骤

(3) 点击计算，  
即可得到飞行器  
的飞行参数和性能。

### 基本信息

悬停时间：	<div><div></div></div>	14.7 min.	≥ 41.2%	多旋翼
剩余负载：	<div><div></div></div>	1.08 kg	≥ 51.9%	多旋翼
最大起飞海拔：	<div><div></div></div>	5.76 km	≥ 65.8%	多旋翼
单程飞行距离：	<div><div></div></div>	3.87 km	≥ 43.6%	多旋翼
最大前飞速度：	<div><div></div></div>	11.2 m/s	≥ 52.8%	多旋翼

### 详细信息

#### 悬停性能：

悬停时间	: 14.7 min.
油门百分比	: 54.2 %
电调电流	: 3.29 A
电机转速	: 5324.1 rpm
电机输出功率	: 31 W
电池输出电压	: 11.8 V
电池输出电流	: 10.4 A
能量效率	: 74.7 %

#### 最大油门性能：

飞行时间	: 3.4 min.
总升力	: 26 N
电机电流	: 15.1 A
电机转速	: 8679.9 rpm
电机输出功率	: 134.4 W
电池输出电压	: 11.2 V
电池输出电流	: 45.3 A
能量效率	: 74.2 %

#### 整体性能：

正常使用	: 11.2 min.
整机重量	: 1 kg
剩余载重	: 1.08 kg
最大起飞海拔	: 5.76 km
最大倾斜角度	: 61.3 °
最大平飞速度	: 11.2 m/s
单程飞行距离	: 3.87 km
抗风等级	: 4 级





# 基础实验

## (4) 其他配置

	整机重量 1.5 kg	机架轴距 450 mm	飞行海拔 0 m	空气温度 25 °C	外形气动 一般
	电池放电下限 15%	安全起飞油门上限 85%	飞控最大倾角 无限制	飞控&附件电流 0.5 A	
	电机品牌: DJI ( 大疆 )		型号: 2312E KV800		
	螺旋桨品牌: DJI ( 大疆 )		型号: CFP 10x3.8		
	电调品牌: *常用...		型号: max 30A		
	电池品牌: *常用...		型号: LiPo 1S-3.7V-20/30C-3700mAh		电芯串并联结构 3 S 1 P

图. 三轴六旋翼配置参数





# 基础实验



图. 三轴六旋翼性能



# 基础实验

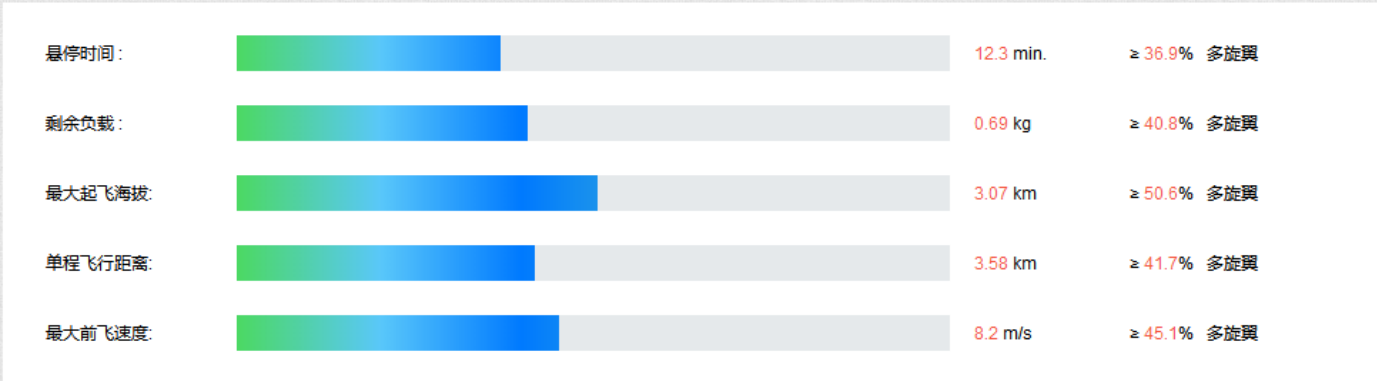
	整机重量 1.5 kg	机架轴距 450 mm	飞行海拔 0 m	空气温度 25 °C	外形气动 一般
	电池放电下限 15%	安全起飞油门上限 85%	飞控最大倾角 无限制	飞控&附件电流 0.5 A	
	电机品牌 DJI ( 大疆 )	型号 2312E KV800			
	螺旋桨品牌 DJI ( 大疆 )	型号 CFP 10x3.8			
	电调品牌 *常用...	型号 max 30A			
	电池品牌 *常用...	型号 LiPo 1S-3.7V-20/30C-3700mAh	电芯串并联结构 3 S 1 P		

图. 四旋翼配置信息



# 基础实验

## 基本信息



## 详细信息

悬停性能:		最大油门性能:		整体性能:	
悬停时间	: 12.3 min.	飞行时间	: 4.6 min.	正常使用	: 10.4 min.
油门百分比	: 66.4 %	总升力	: 27.7 N	整机重量	: 1.5 kg
电调电流	: 3.7 A	电机电流	: 10.3 A	剩余载重	: 0.69 kg
电机转速	: 5647.1 rpm	电机转速	: 7748.8 rpm	最大起飞海拔	: 3.07 km
电机输出功率	: 37 W	电机输出功率	: 95.6 W	最大倾斜角度	: 46.7 °
电池输出电压	: 11.7 V	电池输出电压	: 11.3 V	最大平飞速度	: 8.2 m/s
电池输出电流	: 15.3 A	电池输出电流	: 41.3 A	单程飞行距离	: 3.58 km
能量效率	: 80.6 %	能量效率	: 77.2 %	抗风等级	: 3 级

图. 四旋翼性能





# 基础实验


	整机重量 1.5 kg	机架轴距 550 mm	飞行海拔 0 m	空气温度 25 °C	外形气动 一般
	电池放电下限 15%	安全起飞油门上限 85%	飞控最大倾角 无限制	飞控&附件电流 0.5 A	
	电机品牌 DJI (大疆)	型号 2312E KV800			
	螺旋桨品牌 DJI (大疆)	型号 CFP 10x3.8			
	电调品牌 *常用...	型号 max 30A			
	电池品牌 *常用...	型号 LiPo 1S-3.7V-20/30C-3700mAh	电芯串并联结构 3 S 1 P		

图. 六旋翼基本配置信息





# 基础实验

## 基本信息

悬停时间：	<div><div></div></div>	14.8 min.	≥ 41.3%	多旋翼
剩余负载：	<div><div></div></div>	1.69 kg	≥ 62.8%	多旋翼
最大起飞海拔：	<div><div></div></div>	5.93 km	≥ 66.4%	多旋翼
单程飞行距离：	<div><div></div></div>	3.87 km	≥ 43.6%	多旋翼
最大前飞速度：	<div><div></div></div>	11.8 m/s	≥ 54.1%	多旋翼

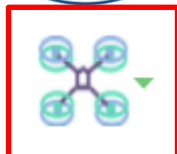
## 详细信息

悬停性能：		最大油门性能：		整体性能：	
悬停时间	: 14.8 min.	飞行时间	: 3.2 min.	正常使用	: 11 min.
油门百分比	: 53.2 %	总升力	: 39.7 N	整机重量	: 1.5 kg
电调电流	: 2.05 A	电机电流	: 9.9 A	剩余载重	: 1.69 kg
电机转速	: 4610.8 rpm	电机转速	: 7580.6 rpm	最大起飞海拔	: 5.93 km
电机输出功率	: 20.1 W	电机输出功率	: 89.5 W	最大倾斜角度	: 62 °
电池输出电压	: 11.8 V	电池输出电压	: 11 V	最大平飞速度	: 11.8 m/s
电池输出电流	: 12.8 A	电池输出电流	: 59.4 A	单程飞行距离	: 3.87 km
能量效率	: 78.8 %	能量效率	: 75.4 %	抗风等级	: 4 级

图. 六旋翼性能



# 基础实验



整机重量 (估)   
 1.5 kg

机架轴距   
 550 mm

飞行海拔   
 0 m

空气温度   
 25 °C

外形气动   
 一般



电池放电下限   
 15%

安全起飞油门上限   
 85%

飞控最大倾角   
 无限制

飞控&附件电流   
 0.5 A



电机品牌:   
 DJI ( 大疆 )

型号:   
 2312E KV800



螺旋桨品牌   
 DJI ( 大疆 )

型号   
 CFP 10x3.8



电调品牌   
 \*常用...

型号   
 max 30A



电池品牌   
 \*常用...

型号   
 LiPo 1S-3.7V-20/30C-3700mAh

电芯串并联结构   
 3 S 1 P

图. 四轴八旋翼配信息





# 基础实验

## 基本信息

悬停时间:	<div><div></div></div>	15.2 min.	$\geq 42\%$	多旋翼
剩余负载:	<div><div></div></div>	1.88 kg	$\geq 65.3\%$	多旋翼
最大起飞海拔:	<div><div></div></div>	6.36 km	$\geq 67.9\%$	多旋翼
单程飞行距离:	<div><div></div></div>	4.03 km	$\geq 44.6\%$	多旋翼
最大前飞速度:	<div><div></div></div>	12.9 m/s	$\geq 56.3\%$	多旋翼

## 详细信息

悬停性能:		最大油门性能:		整体性能:	
悬停时间	: 15.2 min.	飞行时间	: 3 min.	正常使用	: 11.2 min.
油门百分比	: 51.3 %	总升力	: 42 N	整机重量	: 1.5 kg
电调电流	: 1.87 A	电机电流	: 9.8 A	剩余载重	: 1.88 kg
电机转速	: 4464.4 rpm	电机转速	: 7547.2 rpm	最大起飞海拔	: 6.36 km
电机输出功率	: 18.3 W	电机输出功率	: 88.3 W	最大倾斜角度	: 63.7 °
电池输出电压	: 11.8 V	电池输出电压	: 10.9 V	最大平飞速度	: 12.9 m/s
电池输出电流	: 12.5 A	电池输出电流	: 62.8 A	单程飞行距离	: 4.03 km
能量效率	: 78.3 %	能量效率	: 75 %	抗风等级	: 4 级

图. 四轴八旋翼性能



# 基础实验



整机重量 (kg)  
1.5 kg

机架轴距  
650 mm

飞行海拔  
0 m

空气温度  
25 °C

外形气动  
一般



电池放电下限  
15%

安全起飞油门上限  
85%

飞控最大倾角  
无限制

飞控&附件电流  
0.5 A



电机品牌:  
DJI (大疆)

型号:  
2312E KV800



螺旋桨品牌  
DJI (大疆)

型号  
Quantum 8x6



电调品牌  
\*常用...

型号  
max 30A



电池品牌  
\*常用...

型号  
LiPo 1S-3.7V-65/100C-5000mAh

电芯串并联结构  
3 S 1 P

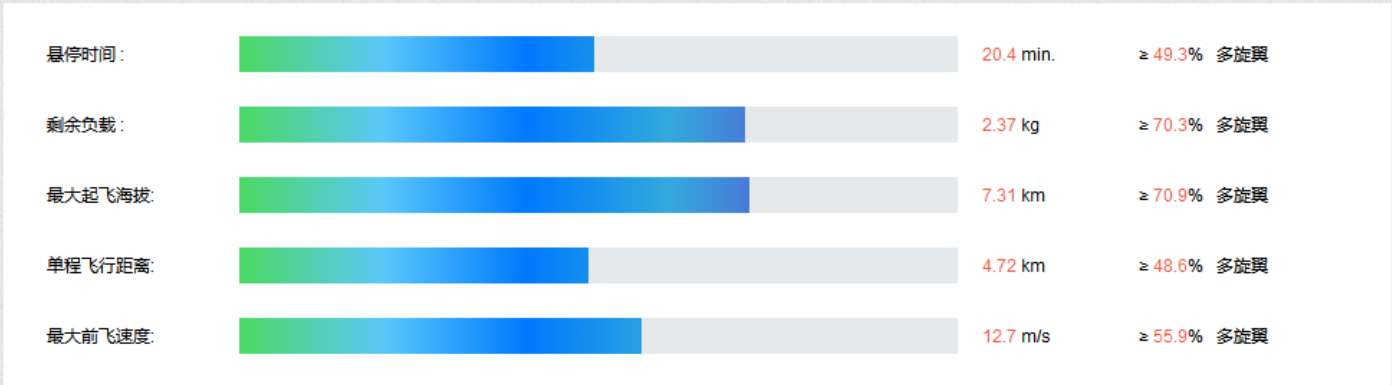
图. 八旋翼配信息





# 基础实验

## 基本信息



## 详细信息

悬停性能:		最大油门性能:		整体性能:	
悬停时间	: 20.4 min.	飞行时间	: 3.4 min.	正常使用	: 14.8 min.
油门百分比	: 50 %	总升力	: 49.8 N	整机重量	: 1.5 kg
电调电流	: 1.5 A	电机电流	: 9.3 A	剩余载重	: 2.37 kg
电机转速	: 4471.6 rpm	电机转速	: 8232.6 rpm	最大起飞海拔	: 7.31 km
电机输出功率	: 14.6 W	电机输出功率	: 90.8 W	最大倾斜角度	: 67.2 °
电池输出电压	: 11.9 V	电池输出电压	: 11.6 V	最大平飞速度	: 12.7 m/s
电池输出电流	: 12.5 A	电池输出电流	: 74.1 A	单程飞行距离	: 4.72 km
能量效率	: 77.5 %	能量效率	: 81.7 %	抗风等级	: 4 级

图. 八旋翼性能





# 基础实验

---

## □ 实验步骤

### (5) 注意事项

#### 1) 轴距过小

螺旋桨型号选 $10 \times 3.8$ （单位：英寸， $1 \text{ 英寸} \approx 25.4 \text{ mm}$ ）大小时，得

$$\begin{aligned}\text{轴距} &= 10 \times 25.4 / \sin(180^\circ / 3) \times 1.2 \\ &= 352 \text{ mm}\end{aligned}$$

若轴距选择偏小，网站会给出错误提示。










# 基础实验

## (4) 注意事项

### 1) 轴距过小

	整机重量 1 kg	机架轴距 100 mm	飞行海拔 0 m	空气温度 25 °C	外形气动 一般
	电池放电下限 15%	安全起飞油门上限 85%	飞控最大倾角 无限制	飞控&附件电流 0.5 A	
	电机品牌: DJI ( 大疆 )	型号: 2212 KV920			
	螺旋桨品牌 DJI ( 大疆 )	型号 CFP 10x3.8			
	电调品牌 *常用...	型号 max 30A			
	电池品牌 *常用...	型号 LiPo 1S-3.7V-25/35C-3000mAh	电芯串并联结构 3 S 1 P		
错误: * 机身与螺旋桨不匹配		错误: * 机身与螺旋桨不匹配.		计算!	





# 基础实验

## □ 实验步骤

### (4) 注意事项

#### 2) 电流过大

错误:

\* 电流超过电机电流上限, 请检查电机或者螺旋桨选择是否正确.

The screenshot shows a drone configuration interface with the following settings:

- 整机重量: 1 kg
- 机架轴距: 450 mm
- 飞行海拔: 0 m
- 空气温度: 25 °C
- 外形气动: 一般
- 电池放电下限: 15%
- 安全起飞油门上限: 85%
- 飞控最大倾角: 无限制
- 飞控附件电流: 0.5 A
- 电机品牌: DJI ( 大疆 )
- 型号: 2212 KV920
- 螺旋桨品牌: DJI ( 大疆 )
- 型号: CFP 10x3.8
- 电调品牌: \*常用...
- 型号: max 30A
- 电池品牌: \*常用...
- 型号: LiPo 1S-3.7V-25/35C-3000mAh
- 电芯串并联结构: 5 S 1 P

A red box highlights the error message: 错误: \* 电流过大,请检查电机或者螺旋桨选择是否正确.

A red box also highlights the "电芯串并联结构" (Cell series and parallel structure) settings, which are set to 5 S 1 P.

A "计算!" (Calculate!) button is located at the bottom right.

图. 电流超过电机电流上限





# 分析实验

## □ 实验目标

### ■ 已知

给定一架四旋翼，其总重量为1.5kg（包括负载），飞行地点海拔为50m，当地温度25°C，动力系统参数如右表所示。

表. 动力系统参数

组件	参数
螺旋桨	APC1045 ( $D_p=10$ 英寸, $H_p=4.5$ 英寸, $B_p=2$ ), $C_T=0.0984$ , $C_M=0.0068$
电机	Sunnysky A2814-900 ( $K_{V0}=900$ RPM/V, $R_m=0.08\ \Omega$ , $W_{mMax}=335$ W, $I_{eMax} = 0.6$ A, $U_{m0} = 10$ V)
电调	$I_{eMax}=30$ A, $R_e=0.008\ \Omega$
电池	ACE ( $C_b=4000$ mAh, $U_b=12$ V, $R_b=0.0084\ \Omega$ , $K_b = 65$ C)





# 分析实验

---

## □ 实验目标

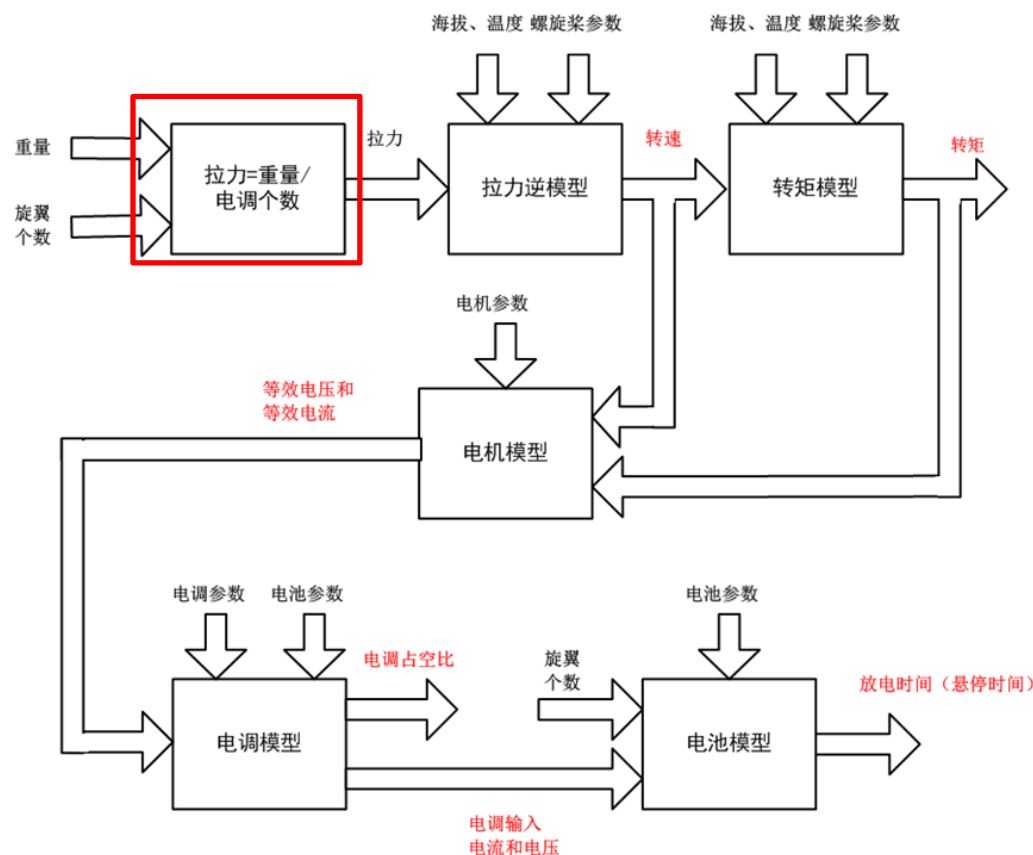
### ■ 目标

- (1) 目标一：给出悬停时间计算的详细过程，并用<https://flyeval.com/paper/>的结果进行对比。
- (2) 目标二：选择一架飞行器，分别列出北京、上海、拉萨、长沙等城市，温度分别为 $0^{\circ}\text{C}$ ， $10^{\circ}\text{C}$ ， $20^{\circ}\text{C}$ ， $30^{\circ}\text{C}$ ， $40^{\circ}\text{C}$ 的悬停时间。分析海拔、温度对悬停时间的影响。
- (3) 目标三：选择一架飞行器，分析螺旋桨大小和个数对悬停时间的影响。



# 分析实验

## □ 目标一计算步骤



### (1) 步骤一：计算拉力

根据整机重量计算单个螺旋桨产生的拉力

$$T = \frac{G}{n_r} = \frac{1.5 \times 9.8}{4} = 3.675\text{N}$$



# 分析实验

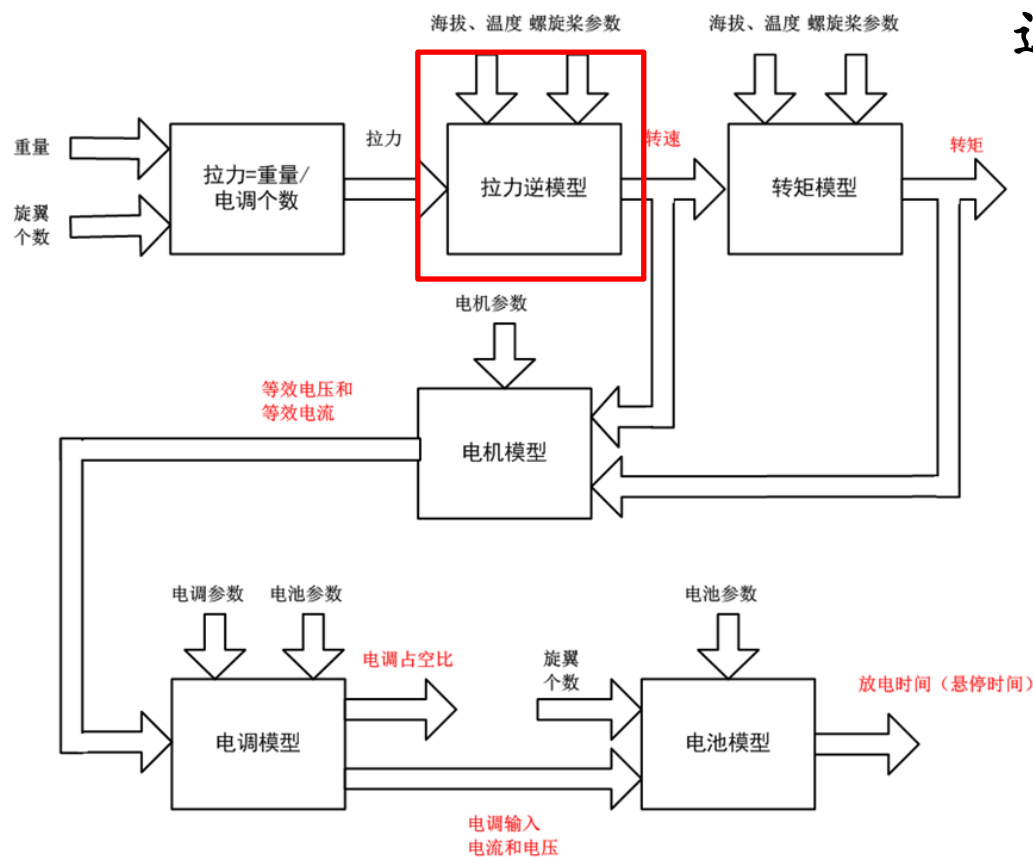
## □ 目标一实验步骤

(2) 步骤二：根据拉力模型计算电机转

速和螺旋桨转矩

首先根据飞行海拔和飞行温度计算大气压强：

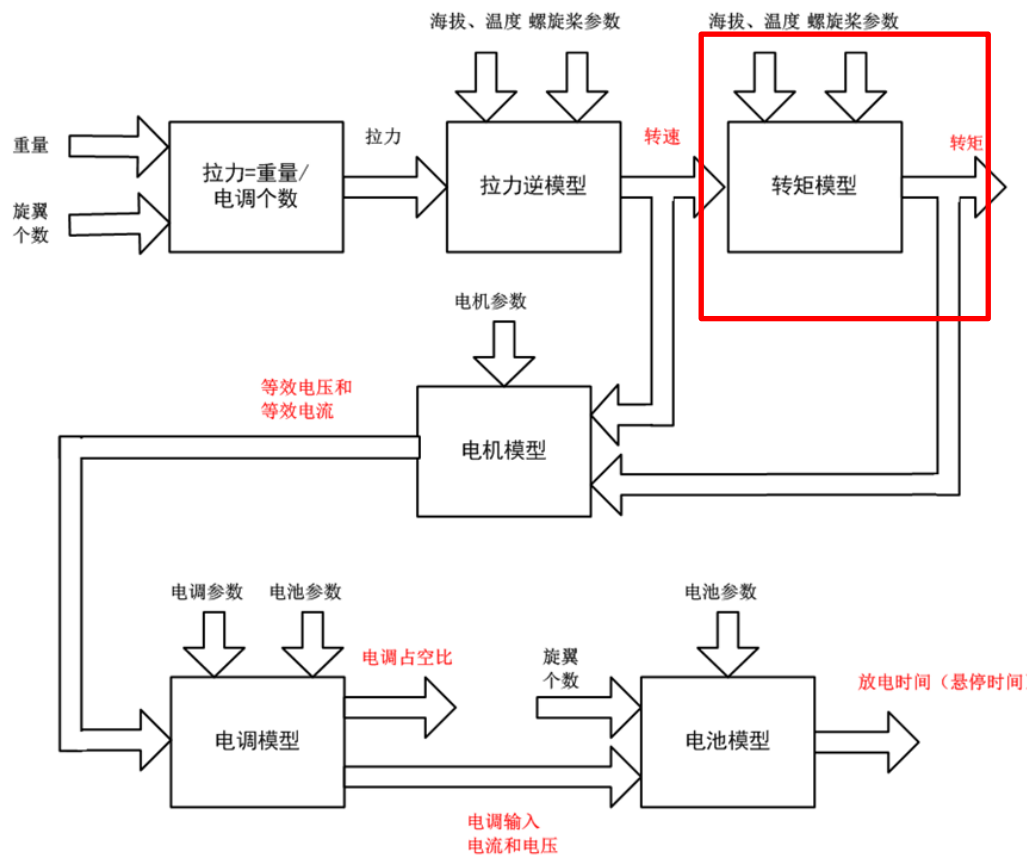
$$\begin{aligned} P_a &= 101325 \left( 1 - 0.0065 \frac{h}{273 + T_t} \right)^{5.2561} \\ &= 101325 \left( 1 - 0.0065 \frac{50}{273 + 25} \right)^{5.2561} \\ &= 100745.52 \text{Pa} \end{aligned}$$





# 分析实验

## □ 目标一实验步骤



(2) 步骤二：根据拉力模型计算电

机转速和螺旋桨转矩

根据大气压强计算飞行环境空气密度：

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{273P_a}{101325(273 + T_t)} \rho_0 \\ &= \frac{273 * 100745.52}{101325(273 + 25)} 1.293 \\ &= 1.178 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$



# 分析实验

## □ 目标一实验步骤

(2) 步骤二：根据拉力模型计算电机转速和螺旋桨转矩

■ 已知空气密度和螺旋桨参数可得电

机转速：

$$\begin{aligned} N &= 60 \sqrt{\frac{T}{\rho D_p^4 C_T}} \\ &= 60 \sqrt{\frac{3.675}{1.178 (10 * 25.4 / 1000)^4 * 0.0984}} \\ &= 5236.51 \text{RPM} \end{aligned}$$

■ 螺旋桨转矩为：

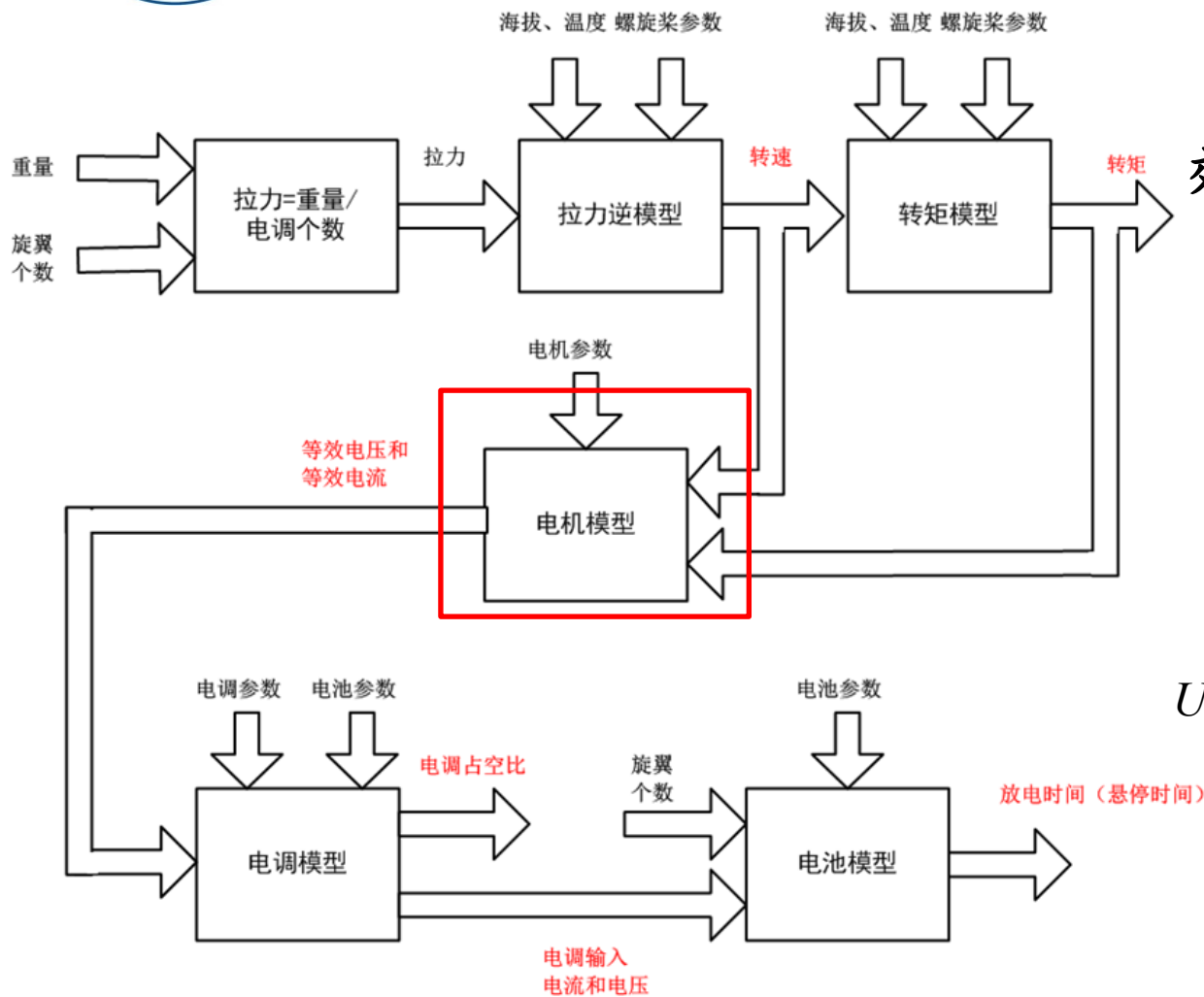
$$\begin{aligned} M &= \rho D_p^5 C_M \left( \frac{N}{60} \right)^2 \\ &= 1.178 * (10 * 25.4 / 1000)^5 * 0.0068 * \left( \frac{5236.51}{60} \right)^2 \\ &= 0.0645 \text{N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$







# 分析实验



(3) 步骤三：根据电机模型计算电机的等效电流  $I_m$  和等效电压  $U_m$ ：

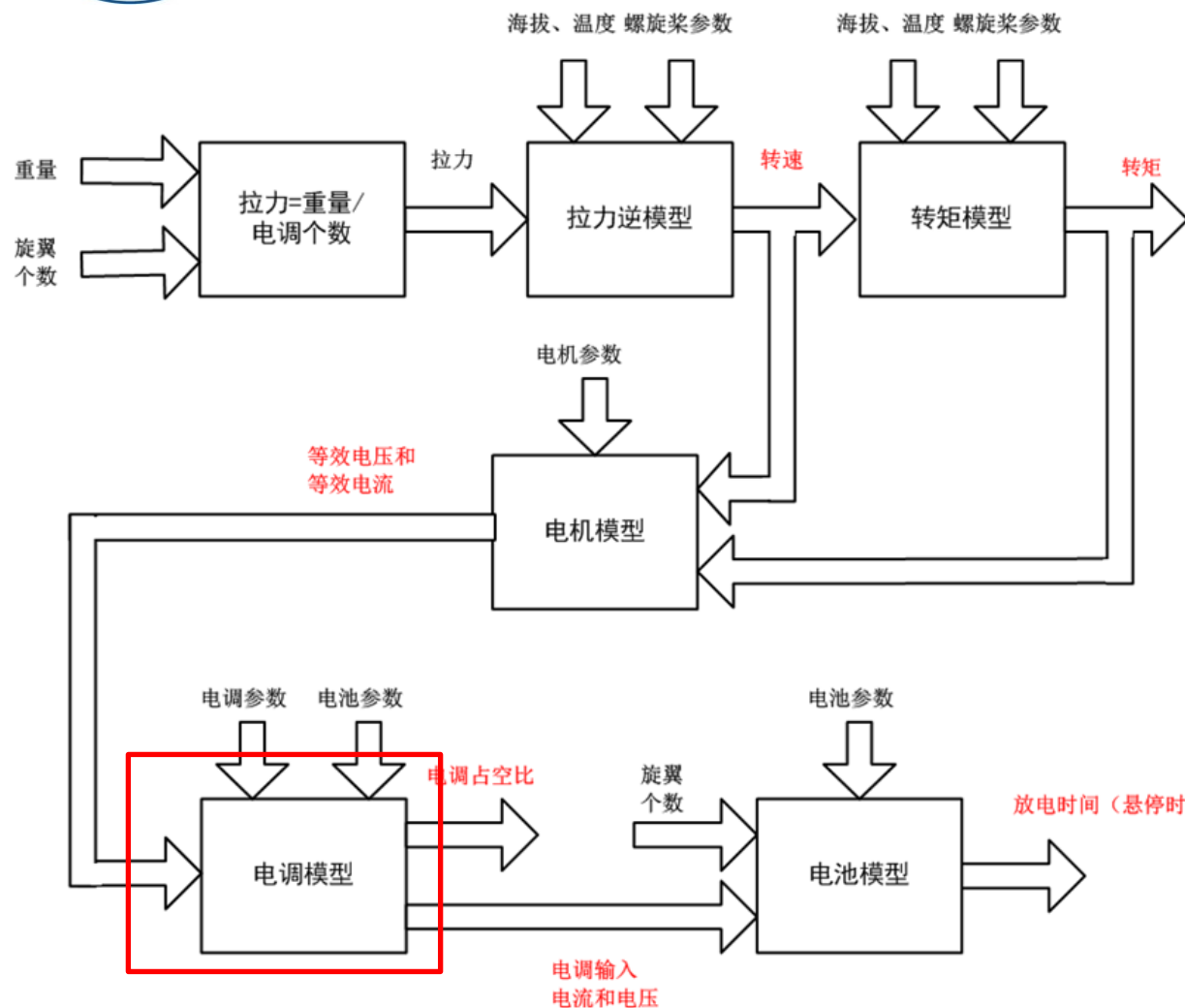
$$\begin{aligned} I_m &= \frac{MK_{V0}U_{m0}}{9.55(U_{m0} - I_{m0}R_m)} + I_{m0} \\ &= \frac{0.0645 * 900 * 10}{9.55(10 - 0.6 * 0.08)} + 0.6 \\ &= 6.708A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_m &= \left( \frac{MK_{V0}U_{m0}}{9.55(U_{m0} - I_{m0}R_m)} + I_{m0} \right) R_m + \frac{U_{m0} - I_{m0}R_m}{K_{V0}U_{m0}} N \\ &= \left( \frac{0.0645 * 900 * 10}{9.55(10 - 0.6 * 0.08)} + 0.6 \right) * 0.08 + \frac{10 - 0.6 * 0.08}{900 * 10} 5236.51 \\ &= 6.327V \end{aligned}$$





# 分析实验



(4) 步骤四:

计算电调输入油门指令  $\sigma$ :

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{U_m + I_m R_e}{U_b} \\ &= \frac{6.327 + 6.708 * 0.008}{12} \\ &= 0.532\end{aligned}$$

计算电调输入电流  $I_e$ :

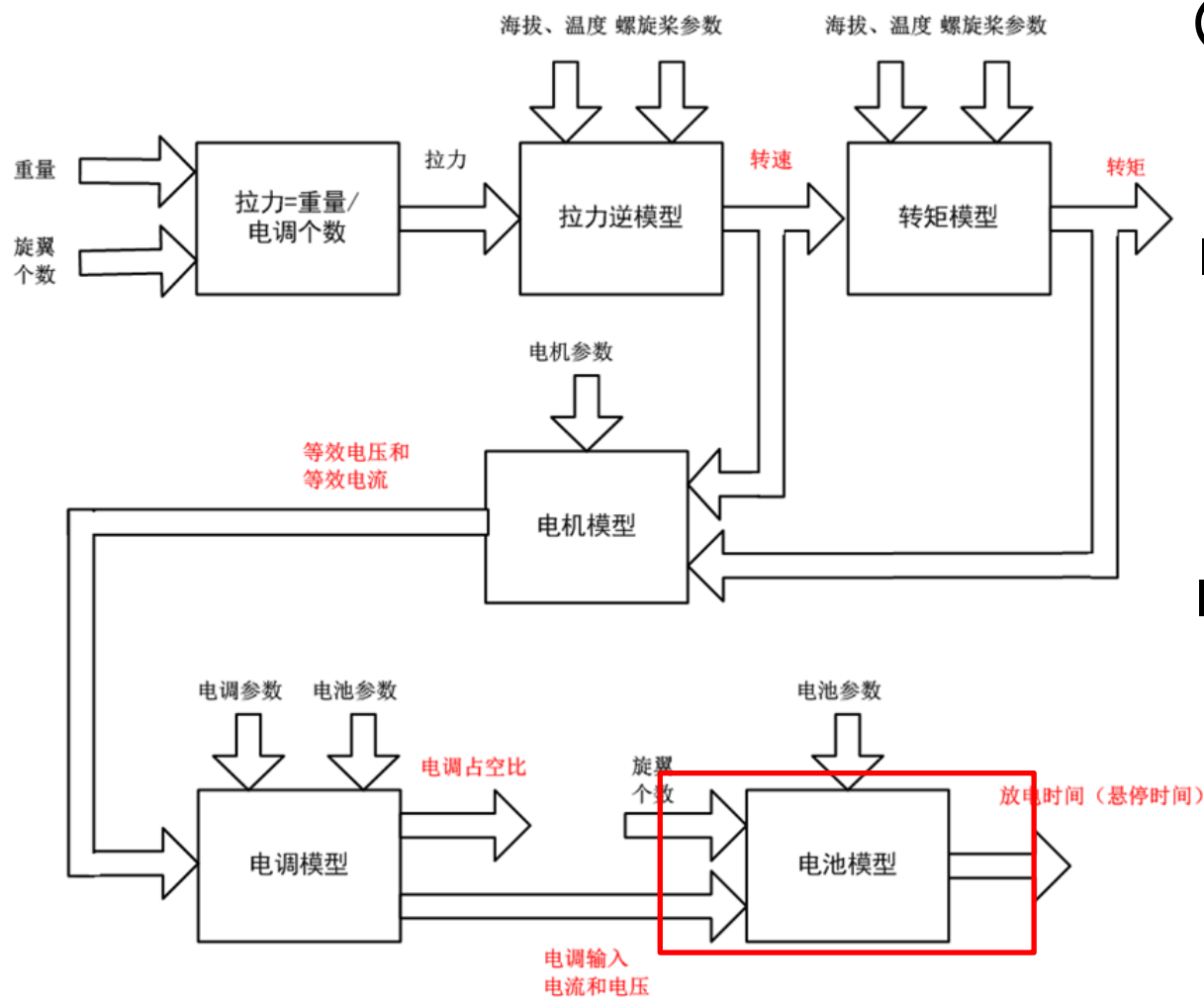
$$\begin{aligned}I_e &= \sigma I_m \\ &= 0.532 * 6.708 \\ &= 3.567 A\end{aligned}$$

计算电调输入电压  $U_e$ :

$$\begin{aligned}U_e &= U_b - I_b R_b \\ &= 12 - 14.768 * 0.0084 \\ &= 11.876 V\end{aligned}$$



# 分析实验



(5) 步骤五：根据电池容量和电池电流

计算悬停时间

■ 计算电池电  
流  $I_b$  :

$$\begin{aligned} I_b &= n_r I_e + I_{\text{other}} \\ &= 4 \times 3.567 + 0.5 \\ &= 14.768\text{A} \end{aligned}$$

■ 最小容量取为总  
容量的15%，得  
悬停时间  $T_b$  为：

$$\begin{aligned} T_b &= \frac{C_b - C_{\min}}{I_b} \times \frac{60}{1000} \\ &= \frac{4000 - 4000 \times 0.15}{14.768} \times \frac{60}{1000} \\ &= 13.8 \text{ min} \end{aligned}$$









# 分析实验

## □ 目标一实验步骤

(6) 步骤六：计算结果与飞行评估网站进行比较

在网站上进行相同配置，参数配置结果右图。

	整机重量 (t) 1.5 kg	机架轴距 450 mm	飞行海拔 50 m	空气温度 25 °C	外形气动 一般 ▼
	电池放电下限 15% ▼	安全起飞油门上限 85% ▼	飞控最大倾角 无限制 ▼	飞控&附件电流 0.5 A	
	电机品牌: SunnySky ( 朗宇 ) ▼	型号: Angel A2814-KV900 ▼			
	螺旋桨品牌 APC ▼	型号 10x4.5MR ▼			
	电调品牌 *自定义.. ▼	持续电流 30 A	电压最大锂电节数 3 ▼ S	内阻 (*选填) 8 mΩ	重量 (*选填) g
	电池品牌 *自定义.. ▼	电芯类型 Li-Po ▼	电芯串联结构 3 S	容量 4000 mAh	持续放电倍率 65 C
				内阻 (*选填) 8.4 mΩ	重量 (*选填) g





# 分析实验

## 目标一实验步骤

### 基本信息

悬停时间:	<div><div></div></div>	13.8 min.	$\geq 39.7\%$	多旋翼
剩余负载:	<div><div></div></div>	1.76 kg	$\geq 63.8\%$	多旋翼
最大起飞海拔:	<div><div></div></div>	6.14 km	$\geq 67.2\%$	多旋翼
单程飞行距离:	<div><div></div></div>	4.43 km	$\geq 47\%$	多旋翼
最大前飞速度:	<div><div></div></div>	14.7 m/s	$\geq 59.5\%$	多旋翼

### 详细信息

#### 悬停性能:

悬停时间	: 13.8 min.
油门百分比	: 53.7 %
电调电流	: 3.56 A
电机转速	: 5235.8 rpm
电机输出功率	: 35.2 W
电池输出电压	: 11.9 V
电池输出电流	: 14.7 A
能量效率	: 79.6 %

#### 最大油门性能:

飞行时间	: 2.9 min.
总升力	: 41.4 N
电机电流	: 17.7 A
电机转速	: 8788.1 rpm
电机输出功率	: 166.6 W
电池输出电压	: 11.4 V
电池输出电流	: 71 A
能量效率	: 78.3 %

#### 整体性能:

正常使用	: 10.3 min.
整机重量	: 1.5 kg
剩余载重	: 1.76 kg
最大起飞海拔	: 6.14 km
最大倾斜角度	: 62.6 °
最大平飞速度	: 14.7 m/s
单程飞行距离	: 4.43 km
抗风等级	: 5 级

点击“计算！”按钮，得到的性能结果如左图。







理论计算时间与网站上计算时间一致！



# 分析实验

## □ 目标二实验步骤

选择试验飞机的基本配置参数如下图所示

	整机重量 (kg) 1.5	机架轴距 450 mm	飞行海拔 4 m	空气温度 25 °C	外形气动 一股
	电池放电下限 15%	安全起飞油门上限 85%	飞控最大倾角 无限制	飞控&附件电流 0.5 A	
	电机品牌 DJI ( 大疆 )	型号 2212 KV920			
	螺旋桨品牌 DJI ( 大疆 )	型号 Turnigy slow fly 9.4x5			
	电调品牌 *常用...	型号 max 30A			
	电池品牌 *常用...	型号 LiPo 1S-3.7V-20/30C-5000mAh	电芯串并联结构 3 S 1 P		



# 分析实验

## □ 目标二实验步骤

(1) 步骤一：海拔高度对悬停时间的影响：查得四个地点的海拔，

得到海拔对悬停时间影响的表格：

表. 海拔对悬停时间的影响

地点	海拔/m	悬停时间/min
上海	4	16.5
北京	43.5	16.5
长沙	500	16.1
拉萨	3658	13.5

由表可以得出结论：海拔越高，悬停时间越短。因为当海拔越高时，空气密度越小。在提供同样大小拉力时，空气密度越小，转速越大。而力矩不变时，转速越大，等效电流和电压越大。进而，电调输入电流也会越大，电池放电电流也会增大。因此，电池容量一定时，电池电流越大悬停时间越短。网站给出的结果与理论推理相符。







# 分析实验

## □ 目标二实验步骤

### (2) 步骤二：空气温度对悬停时间的影响

表. 温度对悬停时间的影响

温度/ $^{\circ}\text{C}$	悬停时间/min
0	17.1
10	16.8
20	16.6
30	16.3
40	16.1

由表可以得出结论：温度越高悬停时间越短。因为空气密度随温度升高而减小，结合上述海拔对悬停时间的影响可知，空气密度越低，悬停时间越短，所以温度越高悬停时间越短，理论推理与网站计算相符。



# 分析实验

## □ 目标三实验步骤

### (1) 步骤一：螺旋桨大小对悬停时间的影响

轴距450,  $r_{max}=1.1r_p$ ,  $r_p$ 最大可选11.4英寸, 修改螺旋桨尺寸, 得到下表:

表. 螺旋桨尺寸对悬停时间的影响

螺旋桨尺寸/英寸	悬停时间/min
10	17
9.4	16.5
9	15.9
8	14.5

由表可以得出结论：螺旋桨越大，悬停时间越长。而螺旋桨越大，提供相同拉力时转速越小，所以悬停时间越长



# 分析实验

## □ 目标三实验步骤

### (2) 步骤二：螺旋桨个数对悬停时间的影响

改变机型得到下表：

表. 螺旋桨个数对悬停时间影响

旋翼类型	悬停时间/min
八旋翼	18.4
四轴八旋翼	17.2
六旋翼	16.8
四旋翼	14.5
三轴六旋翼	15.5
三旋翼	整机重量过大，无法安全起飞

由表可以得出结论：旋翼的个数相同，采用共轴双桨方式悬停时间更短，如八旋翼和四轴八旋翼，但是采用共轴的方式能够减小无人机的尺寸。同是四轴的八旋翼要比四旋翼的悬停时间长。一般来说，总重相同时，旋翼个数越多，悬停时间越长。



## 4. 设计实验

---

### □ 实验目标

#### ■ 已知

Dongjie Shi, Xunhua Dai, Xiaowei Zhang, and Quan Quan. A Practical Performance Evaluation Method for Electric Multicopters. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2017, 22(3):1337-1348.

<https://flyeval.com/paper/>

#### ■ 目标

(1) 海拔0m，温度25° C，设计一架多旋翼飞行器，载重1kg，机架、飞控及配件重量1kg，外界圆半径小于39.37英寸（大约1m），总体重量小于5kg，悬停时间大于15min悬停油门小于满油门的65%。

(2) 分别并列出该飞行器的所有飞行参数及基本飞行性能参数，与飞行评估网站<https://flyeval.com/paper/>的结果进行对比。



# 设计实验

## □ 设计思路

根据单个旋翼所需提供的升力大小选择电机

根据电机的最大电流选择电调、进一步选择电池

最终确定螺旋桨的大小

(1) 根据单个旋翼所需提供的升力大小选择电机。各电机厂商会提供电机的单轴起飞重量，不同电流下所能提供的升力，以及会推荐螺旋桨的大小，这些数据是电机厂商根据实验得出，可以作为设计多旋翼的参考依据。

(2) 选定电机后，即可根据电机的最大电流选择电调，根据电机的供电电压、提供悬停升力时的电机电流和悬停时间选择电池。

(3) 根据电机厂商推荐的螺旋桨大小和机架与旋翼最大尺寸的关系即可最终确定螺旋桨的大小。





# 设计实验

## □ 实验步骤

(1) 步骤一：选择设计多旋翼类型

(2) 步骤二：单个螺旋桨拉力计算

当总重量达到上限时单个螺旋桨所需提供的拉力为：

$$T_{h,up} = \frac{5}{4} \times 9.8 = 12.25N$$

不考虑动力系统重量，单个螺旋桨所需提供的最小拉力为：

$$T_{h,down} = \frac{2}{4} \times 9.8 = 4.9N$$

考虑一定的控制余度：

$$(T_{max,down}, T_{max,up}) = (T_{h,down}, T_{h,up}) / 0.65 = (7.54N, 18.85N)$$

单个电机提供的拉力范围在 **7.54N~18.85N** 之间时会被考虑.





# 设计实验

## □ 实验步骤

(3) 步骤三：根据飞行器的最大尺寸限制，确定螺旋桨的最大尺寸

$$r_{\max} = R \times \sin \frac{\theta}{2} = \frac{1}{2} \times \sin \frac{180}{4} = 353\text{mm}$$

考虑一定裕度，螺旋桨最大尺寸范围为：

$$r_p = r_{\max} / (1.05 \sim 1.2) = 346 \sim 294\text{mm}$$

螺旋桨尺寸一般用直径表示，且单位为英寸，转换得螺旋最大尺寸在23.1~27.2英寸之间





# 设计实验

## □ 实验步骤

### (4) 步骤四：选择电机

可以在各个电机厂商官网上查找合适拉力的电机，例如T-MOTOR电机，进入官网：<http://uavcn.tmotor.com/>，选择“多旋翼”。根据前面选择计算的最大拉力范围，选择MN系列领航型。如右图所示。



图. T-MOTOR 电机选择界面





# 设计实验

## 实验步骤

负载测试数据									
环境温度		/		测试电压环境				恒压	
编号	电压 (V)	螺旋桨	油门	电流 (A)	功率 (W)	拉力 (G)	转速	力效 (G/W)	电机温度 (°C)
MN4014 KV330	22.2	T-MOTOR 15*5CF	50%	3.6	79.92	830	3900	10.39	45
			65%	5.9	130.98	1150	4600	8.78	
			75%	7.8	173.16	1430	5100	8.26	
			85%	10.1	224.22	1690	5600	7.54	
			100%	11.9	264.18	1920	6000	7.27	
		T-MOTOR 16*5.4CF	50%	4.3	95.46	950	3700	9.95	50
			65%	7	155.40	1420	4400	9.14	
			75%	9.6	213.12	1750	4900	8.21	
			85%	12.5	277.50	2060	5400	7.42	
			100%	14.7	326.34	2390	5600	7.32	
		T-MOTOR 17*5.8CF	50%	4.7	104.34	1050	3400	10.06	55
			65%	8	177.60	1580	4100	8.90	
			75%	10.7	237.54	1970	4600	8.29	
			85%	14.4	319.68	2300	5100	7.19	
			100%	17	377.40	2600	5400	6.89	

在负载测试数据表格中，我们可以看到MN4014电机，当电压为22.2V，螺旋桨是T-MOTOR 15 × 5CF时，最大拉力为1.92kg。

图. 电机负载测试数据





# 设计实验

## □ 实验步骤

### (5) 步骤五：选择电调



Share Collect (2)

AIR 40A

\$39.99

Available points: 300 | Points reward: 39

- Special core program
- Special optimized firmware
- Highly-intelligent and adaptive
- Twisted-pair design

1 [Add to cart](#) [Buy now](#)

USD100 Consumption Free Shipping by DHL Express (Excl

#### SPECIFICATIONS

Model	Con,Current	Peak Current (10S)	BEC	Lipo	programmable Item	Weight	Size(L*W*H)
AIR 40A	40A	60A	NO	2-6S	Timing (Intermediate/High)	26g	55.6mm*25.2mm*11.3mm

如选择T-MOTOR电调，因为我们选择的电机的最大电流为25A，我们这里选择电调的持续电流为40A的AIR 40A电调。

图. T-MOTOR电调





# 设计实验

## □ 实验步骤

### (6) 步骤六：选择螺旋桨



图. T-MOTOR螺旋桨

基本参数			
螺旋桨型号	15" *5 (381mm*127mm)	使用环境温度	-40℃ ~ 65℃
参考单片重量(g)	26.5g	保存温度	-10℃ ~ 50℃
材质	碳纤+树脂	保存湿度	<85%
表面处理工艺	打磨面	表现较佳转速段	5200-7000 转/分钟
属性归类	一体桨	极限拉力	6kg

图. T-MOTOR螺旋桨的基本参数

根据官方配置，我们选择R15 5螺旋桨，  
在基本配置中可以看到单个螺旋桨重力为  
26.5g。



# 设计实验

## □ 实验步骤

### (7) 步骤七: 选择电池

若选择格式电池, 进入公司官网: <http://www.ace-pow.com/>, 在无人机电池中选择高压版。



22000mAh植保无人机电池-TATTU高压版  
TIME 2016-12-29  
产品名称: Tattu无人机植保电池高压版 容量: 22000mAh 电芯组合: 6S1P 电压: 22.8V 放电倍率: 15C 持续放电电流: 100A 建议充电电流: 5A 支持充电电流: 10A 瞬间放电电流: 550A 成品尺寸(厚\*宽\*长): 62.5\*93\*213mm 产品重量: 2360g 放电插头: 螺旋 充电插头: JST-XHR-7P 反向+AB扣 充电线号及线长: 充电22#出65mm 放电线号及线长: 放电10#出150mm 出线方式: 两边出线 T...



高压版航拍无人机电池\_22.8V  
TIME 2016-12-29  
产品名称: Tattu高压版航拍无人机电池 22.8V 电池类型: 聚合物锂电池 容量: 16000mAh 电芯组合: 6S1P 电压: 22.8V 放电倍率: 15C 持续放电电流: 100A 建议充电电流: 5A 支持充电电流: 10A 瞬间放电电流: 240A 成品尺寸(厚\*宽\*长): 64.5\*77.5\*202mm 产品重量: 1880g 放电插头: 螺旋 充电插头: JST-XHR-7P 反向+AB扣 充电线号及线长: 充电22#出65mm 放电线号及线长: 放电10#出150mm 出线方式: 两边出线 T...



12000mAh高压版植保无人机电池-TATTU  
TIME 2016-12-29  
产品名称: Tattu植保无人机电池\_高压系列电池 容量: 12000mAh 电芯组合: 6S1P 电压: 22.8V 放电倍率: 15C 持续放电电流: 100A 建议充电电流: 5A 支持充电电流: 10A 瞬间放电电流: 180A 成品尺寸(厚\*宽\*长): 54\*76\*202mm 产品重量: 1460g 放电插头: 螺旋 充电插头: JST-XHR-7P 反向+AB扣 充电线号及线长: 充电22#出65mm 放电线号及线长: 放电10#出150mm 出线方式: 两边出线 T...

图. 格式电池

若选择12000mAh的电池, 根据前面选择的电机、电调和螺旋桨以及左图中的信息, 得到四旋翼总重量为:

$$G = (2 + (0.171 + 0.026 + 0.0265) \times 4 + 1.46) \times 9.8 = 42.6692 \text{ N}$$

单个螺旋桨所需拉力为:

$$T_h = \frac{G}{4} \times 9.8 = 10.6673 \text{ N.}$$

此时油门小于65%, 在50%~60%油门之间进行简单的线性插值可得拉力为10.6673N, 电流为5.78A, 计算悬停时间为:

$$T = \frac{C_b - C_{\min}}{I_b} \cdot \frac{60}{1000} = \frac{0.85 \times 16000}{5.78 \times 4 + 0.5} * 0.06 = 25.9 \text{ min}$$



# 设计实验

---

## □ 实验步骤

### (8) 步骤八：重新计算轴距

根据螺旋桨尺寸重新计算多旋翼轴距：

$$2R = \frac{2 \times r_p}{\sin\left(\frac{180}{n_r}\right)} = \frac{15 \times 25.4}{\sin(180/4)} = 539\text{mm}$$

为了留出一定裕度：取轴距=539×1.1=593mm, 选择轴距为600mm。





# 设计实验

## □ 实验步骤

(9) 步骤九：使用<https://flyeval.com/paper/>网站计算飞行参数。

	机架+负载 2.0 kg	机架轴距 600 mm	飞行海拔 0 m	空气温度 25 °C	外形气动 一般 ▼
	电池放电下限 15% ▼	安全起飞油门上限 85% ▼	飞控最大倾角 无限制 ▼	飞控&附件电流 0.5 A	
	电机品牌: T-MOTOR (老虎电机) ▼		型号: MN4014 KV330 ▼		
	螺旋桨品牌 T-MOTOR (老虎电机) ▼		型号 15x5 CF ▼		
	电调品牌 T-MOTOR (老虎电机) ▼		型号 AIR 40A ▼		
	电池品牌 ACE (格氏电池) ▼	型号 LiPo TATTU 6S-22.2V-15C-12... ▼		电池串联-并联组合 1 ▼ S 1 ▼ P	

图. 自主设计配置





# 设计实验

## □ 实验步骤

可以看到网站计算的悬停时间与估计的悬停时间比较接近，飞行器的剩余负载还很大，有5.44kg，**如果要继续增加续航时间可在整体结构不变的前提下增大电池容量。**

### 详细信息

#### 悬停性能：

悬停时间	: 22.5 min.
油门百分比	: 63.6 %
电调电流	: 6.69 A
电机转速	: 4623.5 rpm
电机输出功率	: 132.2 W
电池输出电压	: 23.7 V
电池输出电流	: 27.2 A
能量效率	: 80.9 %

#### 最大油门性能：

飞行时间	: 7 min.
总升力	: 94.3 N
电机电流	: 21.8 A
电机转速	: 6716.3 rpm
电机输出功率	: 417.8 W
电池输出电压	: 22.9 V
电池输出电流	: 87.3 A
能量效率	: 79.8 %

#### 整体性能：

正常使用	: 17.8 min.
整机重量	: 4.56 kg
剩余载重	: 2.8 kg
最大起飞海拔	: 3.85 km
最大倾斜角度	: 51.7 °
最大平飞速度	: 12.4 m/s
单程飞行距离	: 8.5 km
抗风等级	: 4 级

图. 自主设计飞行器性能的参数





# 小结

---

(1) 我们设计的在线性能评估网站<https://flyeval.com/paper/>可以方便地得到多旋翼飞行器的性能估算结果，在选择好多旋翼的动力系统和飞行环境后即可得到悬停时间、剩余负载、单程飞行距离、最大前飞速度等性能结果。

(2) 根据我们建立的螺旋桨、电机、电调和电池模型，在给定螺旋桨参数、电机参数、电调参数、电池参数后可以估算出多旋翼飞行器的悬停时间。同时根据上述模型分析可以推理得知海拔越高、温度越高，悬停时间越短；螺旋桨半径越大，螺旋桨个数越多，悬停时间越长。

(3) 给定多旋翼的飞行环境，载重、最大重量、最大尺寸、最小悬停时间时，可以在网上根据电机、电调、螺旋桨、电池的生产厂商提供的产品数据选择符合我们设计要求的多旋翼动力系统。

(4) 在接下来的第六章建模实验中，将会用到本章的设计参数。



---

# 谢 谢！