



多旋翼飞行器设计与控制 系列实验

多旋翼飞行器动力系统设计实验

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

多旋翼飞行器设计与控制 *

本书是一本全面、系统介绍多旋翼飞行器原理的教科书，不仅介绍飞行器的一般构造技术，而且重点讲述了多旋翼飞行器系统。本书共分4章，分为4部分，涵盖了多旋翼飞行器的设计、建模、稳定性分析、控制策略等方面。

本书的主要特色如下：

- 理论性和实用性。涵盖了自平衡的内含和反馈控制。
- 稳定性和系统性的设计。
- 设计性。注重时代需求。

本书内容也与生产实际使用的自动驾驶仪密切相关，可为相关行业提供理论支持。因此可作为高等院校飞行器专业的学生、教师、研究人员和工程技术人员的重要参考。

This introductory text is a welcome addition to the literature on multicopter design and control, as which the author is an acknowledged authority. The book is directed to advanced undergraduate and beginning graduate students in aerospace and control (or electrical engineering), as well as to multicopter designers and hobbyists. (本书作者是多旋翼飞行器设计与控制领域的公认专家，他写的这本入门教科书对多旋翼飞行器设计与控制相关文献的一个极好的补充。本书适用于航空和控制（或电子）工程领域的既有本科生和研究生，以及多旋翼飞行器设计领域的业余爱好者。)

— W. Murray Busham, 多伦多大学教授

This is the single best introduction to multicopter control. Clear, comprehensive and progressing from basic principles to advanced techniques, it's a must read for anyone hoping to learn how to design flying robots. (这是一本多旋翼飞行器控制最佳入门的教科书。本书清晰全面，涵盖了从基本原理到高级技术的发展过程，这对任何希望学习如何设计飞行机器人的人来说都是一个必读教材。)

— Chris Anderson, 3D Robotics CEO



定价：00.00元

多旋翼飞行器设计与控制



全权著 杜光勋等译

电子工业出版社

多旋翼飞行器设计与控制

全权著

杜光勋 赵峰亮 戴训华 任锦瑞 邓恒译

郭祥 插图设计

中国工业出版社 电子工业出版社



北航可靠飞行控制研究组
BUAA Reliable Flight Control Group



基本原理

动力系统



图. 多旋翼动力系统

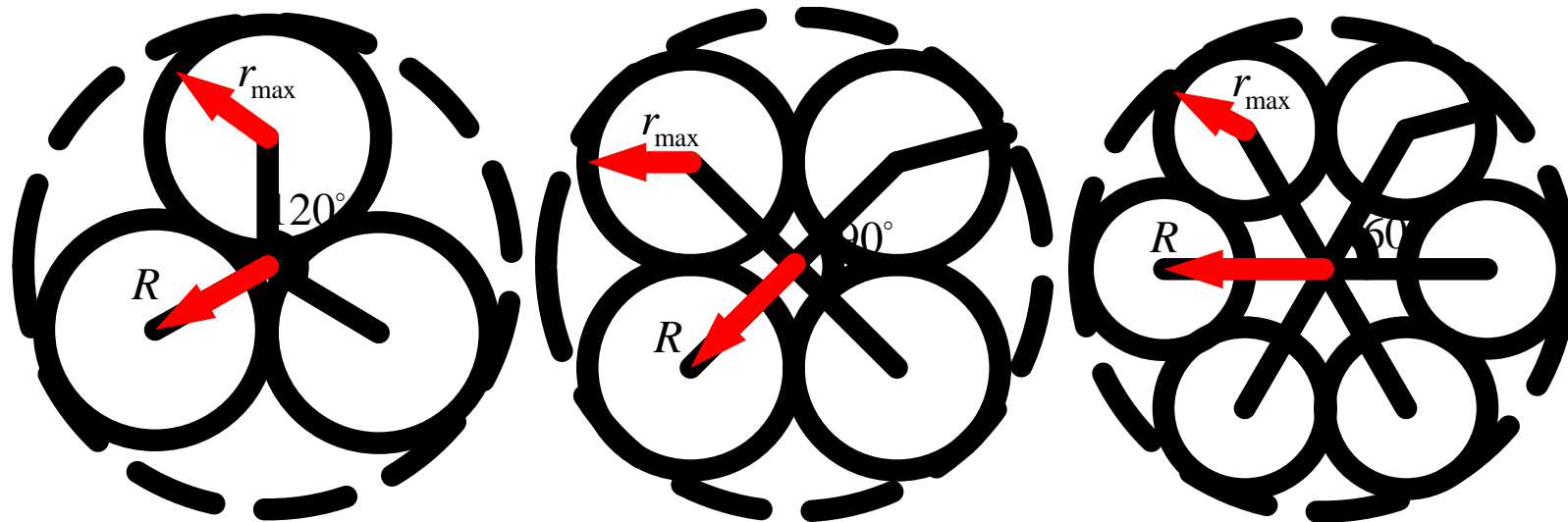




基本原理

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)

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



(a) Y6六旋翼（共轴双桨）

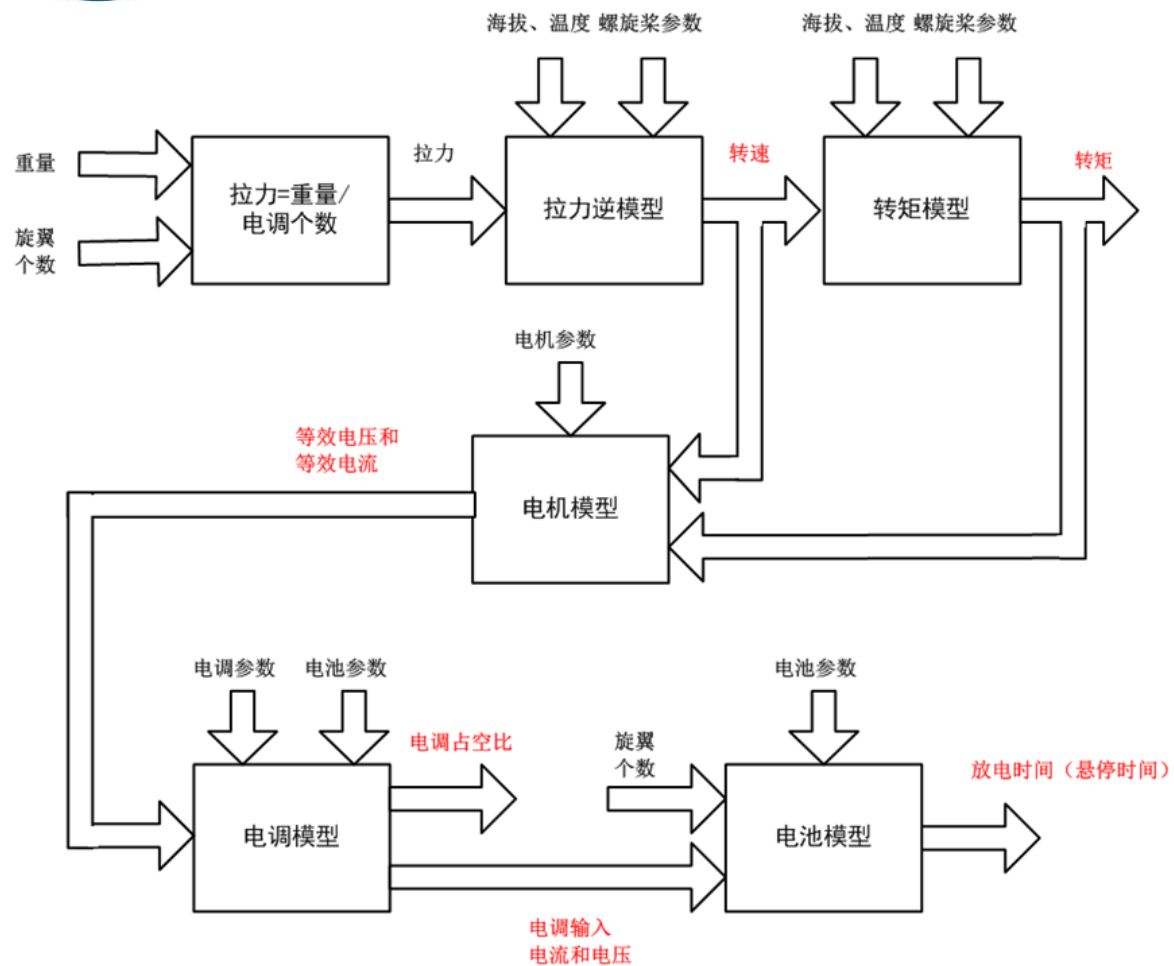
(b) 传统四旋翼

(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

<http://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，分别并列该飞行器的所有飞行参数及基本飞行性能参数。

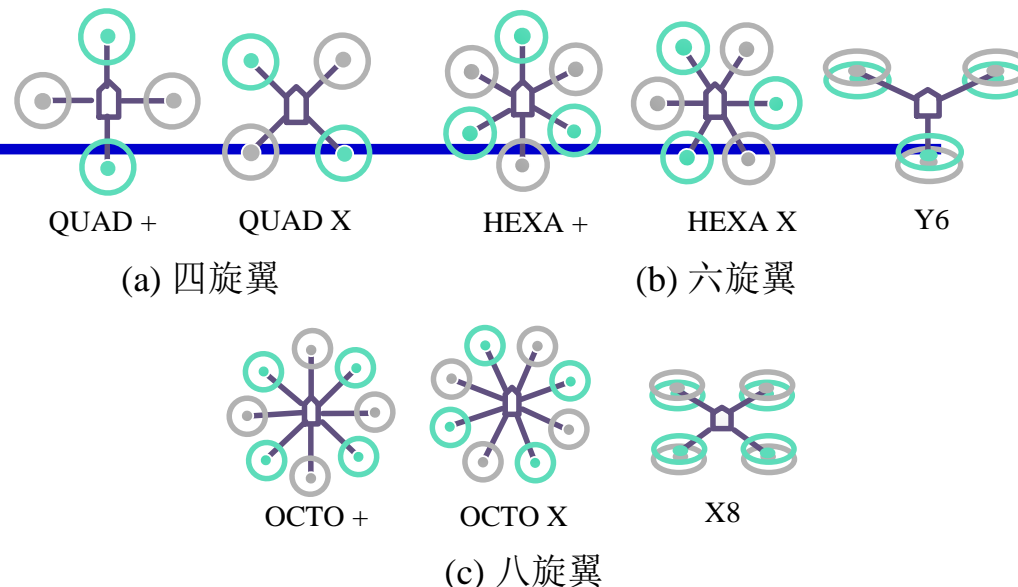


图. 不同的多旋翼



基础实验

□ 实验步骤

(1) 如下图所示，选择机型，以三旋翼为例：设置整机重量为1.0kg，初选轴距为450mm，飞行海拔设置为0m，空气温度设置为25°C，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

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

基本信息

悬停时间:		13.4 min.	≥ 39% 多旋翼
剩余负载:		1.1 kg	≥ 52.4% 多旋翼
最大起飞海拔:		4.4 km	≥ 59.4% 多旋翼
单程飞行距离:		4.07 km	≥ 44.9% 多旋翼
最大前飞速度:		10.6 m/s	≥ 51.5% 多旋翼

详细信息

悬停性能:

悬停时间	: 13.4 min.
油门百分比	: 60 %
电调电流	: 2.83 A
电机转速	: 5155.1 rpm
电机输出功率	: 28.2 W
电池输出电压	: 11.8 V
电池输出电流	: 14.1 A
能量效率	: 80 %

最大油门性能:

飞行时间	: 3.9 min.
总升力	: 32.6 N
电机电流	: 10.1 A
电机转速	: 7681.8 rpm
电机输出功率	: 93.2 W
电池输出电压	: 11.2 V
电池输出电流	: 48.7 A
能量效率	: 76.5 %

整体性能:

正常使用	: 10.6 min.
整机重量	: 1.5 kg
剩余载重	: 1.1 kg
最大起飞海拔	: 4.4 km
最大倾斜角度	: 54.7 °
最大平飞速度	: 10.6 m/s
单程飞行距离	: 4.07 km
抗风等级	: 4 级

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

悬停时间:		12.3 min.	≥ 36.9%	多旋翼
剩余负载:		0.69 kg	≥ 40.8%	多旋翼
最大起飞海拔:		3.07 km	≥ 50.6%	多旋翼
单程飞行距离:		3.58 km	≥ 41.7%	多旋翼
最大前飞速度:		8.2 m/s	≥ 45.1%	多旋翼

详细信息

悬停性能:

悬停时间	: 12.3 min.
油门百分比	: 66.4 %
电调电流	: 3.7 A
电机转速	: 5647.1 rpm
电机输出功率	: 37 W
电池输出电压	: 41.7 V
电池输出电流	: 15.3 A
能量效率	: 80.6 %

最大油门性能:

飞行时间	: 4.6 min.
总升力	: 27.7 N
电机电流	: 10.3 A
电机转速	: 7748.8 rpm
电机输出功率	: 95.6 W
电池输出电压	: 41.3 V
电池输出电流	: 41.3 A
能量效率	: 77.2 %

整体性能:

正常使用	: 10.4 min.
整机重量	: 1.5 kg
剩余载重	: 0.69 kg
最大起飞海拔	: 3.07 km
最大倾斜角度	: 46.7 °
最大平飞速度	: 8.2 m/s
单程飞行距离	: 3.58 km
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:		14.8 min.	≥ 41.3%	多旋翼
剩余负载:		1.69 kg	≥ 62.8%	多旋翼
最大起飞海拔:		5.93 km	≥ 66.4%	多旋翼
单程飞行距离:		3.87 km	≥ 43.6%	多旋翼
最大前飞速度:		11.8 m/s	≥ 54.1%	多旋翼

详细信息

悬停性能:

悬停时间	: 14.8 min.
油门百分比	: 53.2 %
电调电流	: 2.05 A
电机转速	: 4610.8 rpm
电机输出功率	: 20.1 W
电池输出电压	: 11.8 V
电池输出电流	: 12.8 A
能量效率	: 78.8 %

最大油门性能:

飞行时间	: 3.2 min.
总升力	: 39.7 N
电机电流	: 9.9 A
电机转速	: 7580.6 rpm
电机输出功率	: 89.5 W
电池输出电压	: 11 V
电池输出电流	: 59.4 A
能量效率	: 75.4 %

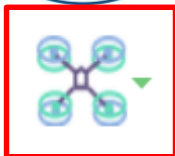
整体性能:

正常使用	: 11 min.
整机重量	: 1.5 kg
剩余载重	: 1.69 kg
最大起飞海拔	: 5.93 km
最大倾斜角度	: 62 °
最大平飞速度	: 11.8 m/s
单程飞行距离	: 3.87 km
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:		15.2 min.	≥ 42% 多旋翼
剩余负载:		1.88 kg	≥ 65.3% 多旋翼
最大起飞海拔:		6.36 km	≥ 67.9% 多旋翼
单程飞行距离:		4.03 km	≥ 44.6% 多旋翼
最大前飞速度:		12.9 m/s	≥ 56.3% 多旋翼

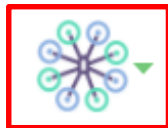
详细信息

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 (估)
 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

悬停时间:		20.4 min.	≥ 49.3%	多旋翼
剩余负载:		2.37 kg	≥ 70.3%	多旋翼
最大起飞海拔:		7.31 km	≥ 70.9%	多旋翼
单程飞行距离:		4.72 km	≥ 48.6%	多旋翼
最大前飞速度:		12.7 m/s	≥ 55.9%	多旋翼

详细信息

悬停性能:

悬停时间	: 20.4 min.
油门百分比	: 50 %
电调电流	: 1.5 A
电机转速	: 4471.6 rpm
电机输出功率	: 14.6 W
电池输出电压	: 11.9 V
电池输出电流	: 12.5 A
能量效率	: 77.5 %

最大油门性能:

飞行时间	: 3.4 min.
总升力	: 49.8 N
电机电流	: 9.3 A
电机转速	: 8232.6 rpm
电机输出功率	: 90.8 W
电池输出电压	: 11.6 V
电池输出电流	: 74.1 A
能量效率	: 81.7 %

整体性能:

正常使用	: 14.8 min.
整机重量	: 1.5 kg
剩余载重	: 2.37 kg
最大起飞海拔	: 7.31 km
最大倾斜角度	: 67.2 °
最大平飞速度	: 12.7 m/s
单程飞行距离	: 4.72 km
抗风等级	: 4 级

图. 八旋翼性能



基础实验

□ 实验步骤

(4) 注意事项

1) 轴距过小

螺旋桨型号选10*3.8（单位：英寸，1英寸 \approx 25.4mm）大小时，由书公式

(3.1)、(3.2)得

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


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.

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 various parameters. A red dashed box highlights the motor and propeller settings. A red solid box highlights an error message at the bottom: "错误: 电流过大, 请检查电机或者螺旋桨选择是否正确." (Error: Current too high, please check the motor or propeller selection is correct). The error message is positioned below the motor and propeller settings. The "计算!" (Calculate!) button is visible at the bottom right.

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

错误: 电流过大, 请检查电机或者螺旋桨选择是否正确.

计算!

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	参数指标
螺旋桨 (APC1045)	$\Theta_p = \{\text{直径 } D_p = 10\text{inch}、\text{螺距 } H_p = 4.5\text{inch}、\text{桨叶数 } B_p = 2、\text{拉力系数 } C_T = 0.0984、\text{转矩系数 } C_M = 0.0068\}$
电机 (Sunnysky A2814-900)	$\Theta_m = \{\text{标称空载电流 } I_{m0} = 0.6\text{A}、\text{标称空载电压 } U_{m0} = 10\text{V}、\text{标称空载 KV 值 } K_{V0} = 900\text{rpm/V}、\text{最大电流 } W_{m\text{Max}} = 335\text{W}、\text{内阻 } R_m = 0.08\Omega\}$
电调 (max 30A)	$\Theta_e = \{\text{最大电流 } I_{e\text{Max}} = 30\text{A}、\text{内阻 } R_e = 0.008\Omega\}$
电池 (Lipo4000mA)	$\Theta_b = \{\text{总容量 } C_b = 4000\text{mAh}、\text{内阻 } R_b = 0.0084\Omega、\text{总电压 } U_b = 12\text{V}、\text{最大放电倍率 } K_b = 65\text{C}\}$



分析实验

□ 实验目标

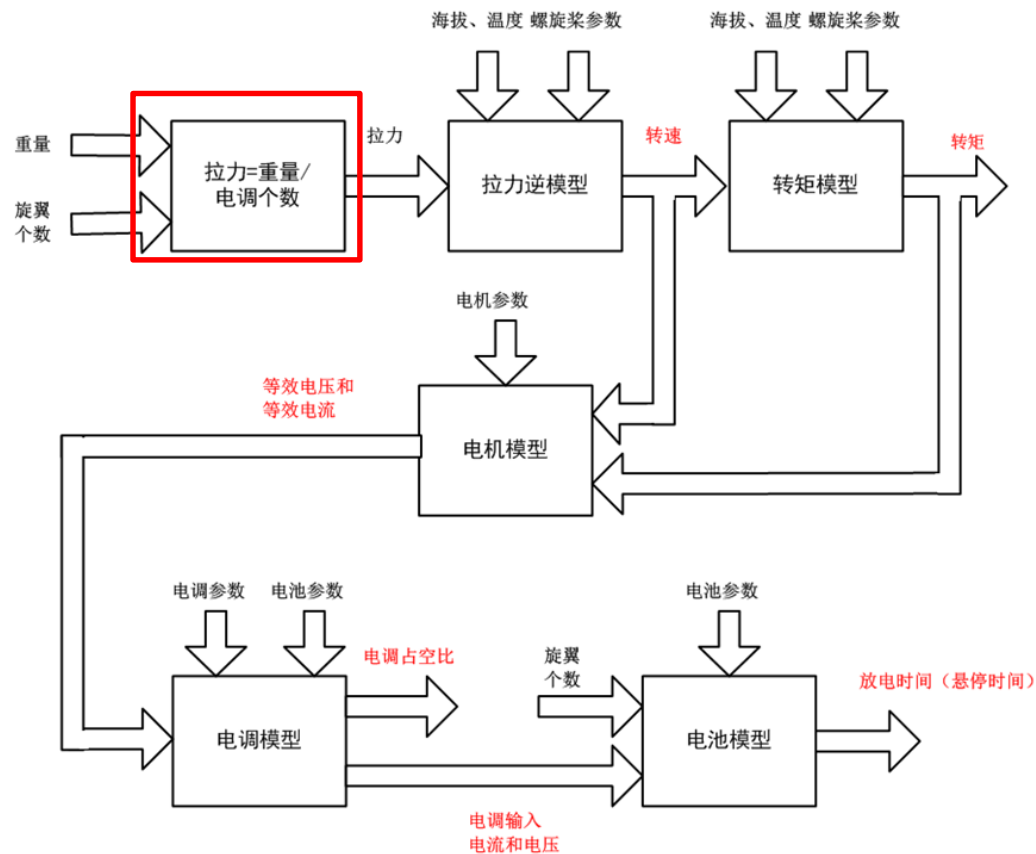
■ 目标

- (1) 目标1: 给出计算悬停时间详细计算过程, 并用<http://flyeval.com/paper>进行对比。
- (2) 目标2: 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°C , 10°C , 20°C , 30°C , 40°C 的悬停时间。分析海拔、温度对悬停时间的影响。
- (3) 目标3: 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1实验步骤



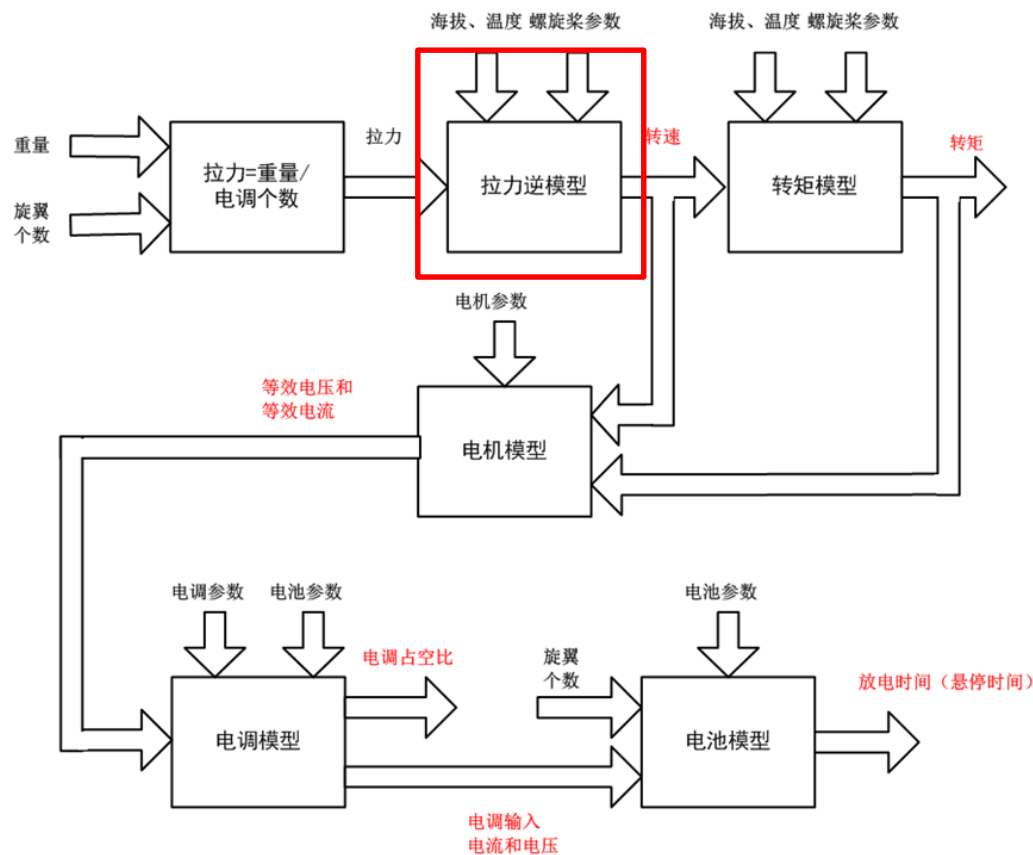
(1) 根据整机重量计算单个螺旋桨产生的拉力，式 (4.24)

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



分析实验

□ 目标1实验步骤



(2) 由逆拉力模型求电机转速和螺旋桨转矩。

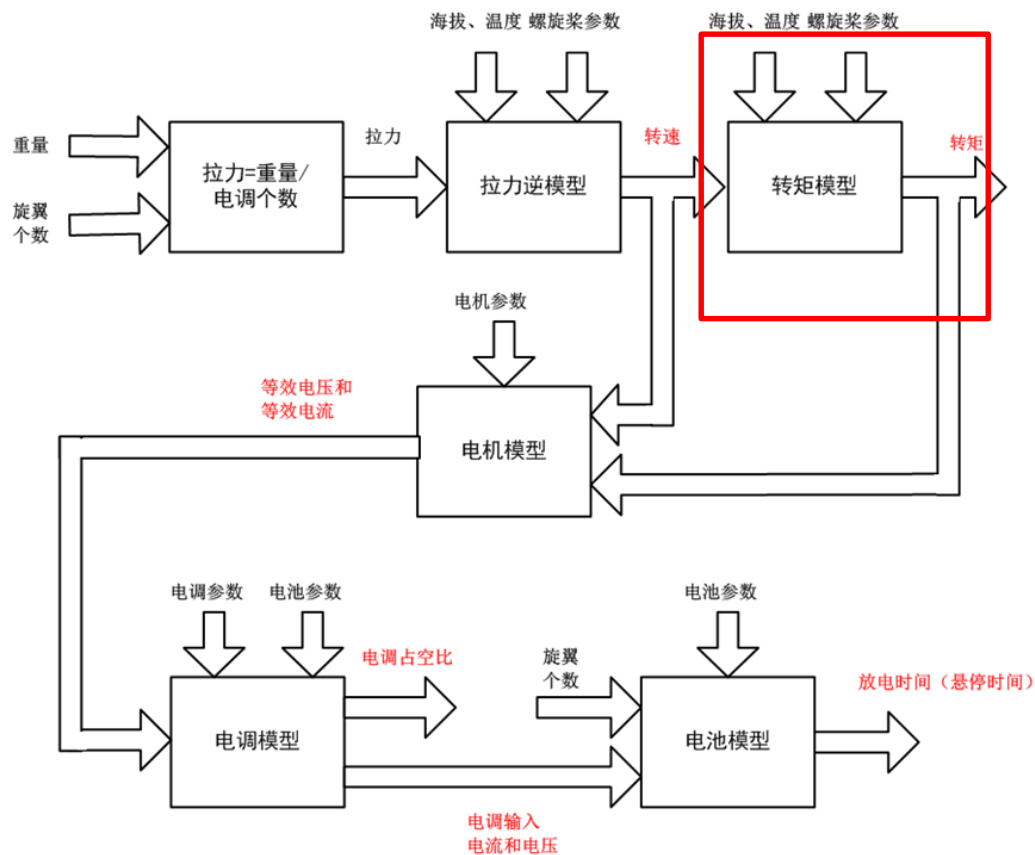
参考 (4.4)，首先根据飞行海拔和飞行温度计算大气压强

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



分析实验

目标1实验步骤



(2) 由逆拉力模型求电机转速和螺旋桨转矩。

由大气压强计算飞行环境空气密度，
由式(4.3)得：

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



分析实验

□ 目标1实验步骤

(2) 由逆拉力模型求电机转速和螺旋桨转矩。

■ 已知空气密度和螺旋桨参数，由式

(4.25)，可得电机转速：

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

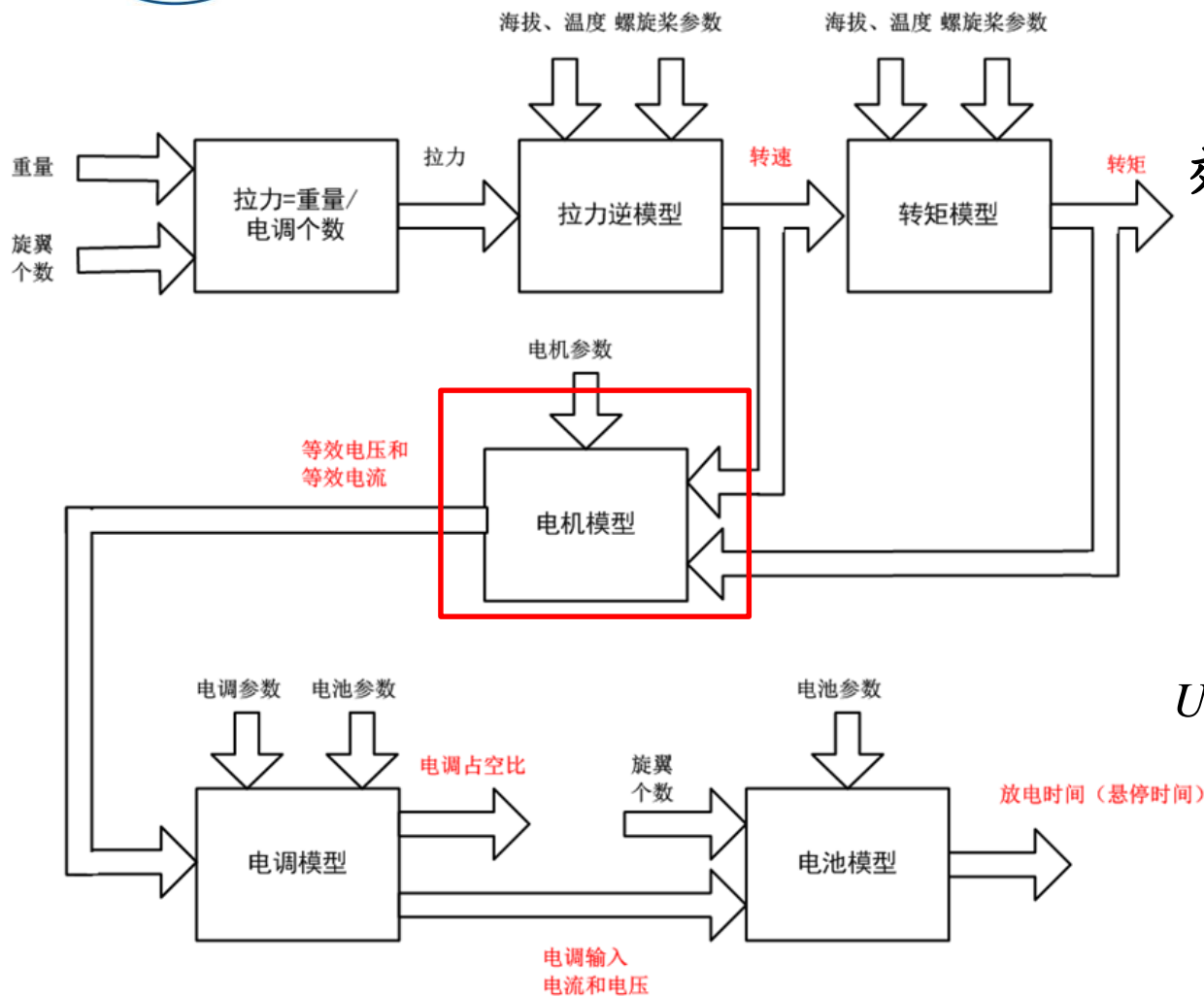


■ 由式(4.25)可得螺旋桨转矩为：

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



分析实验



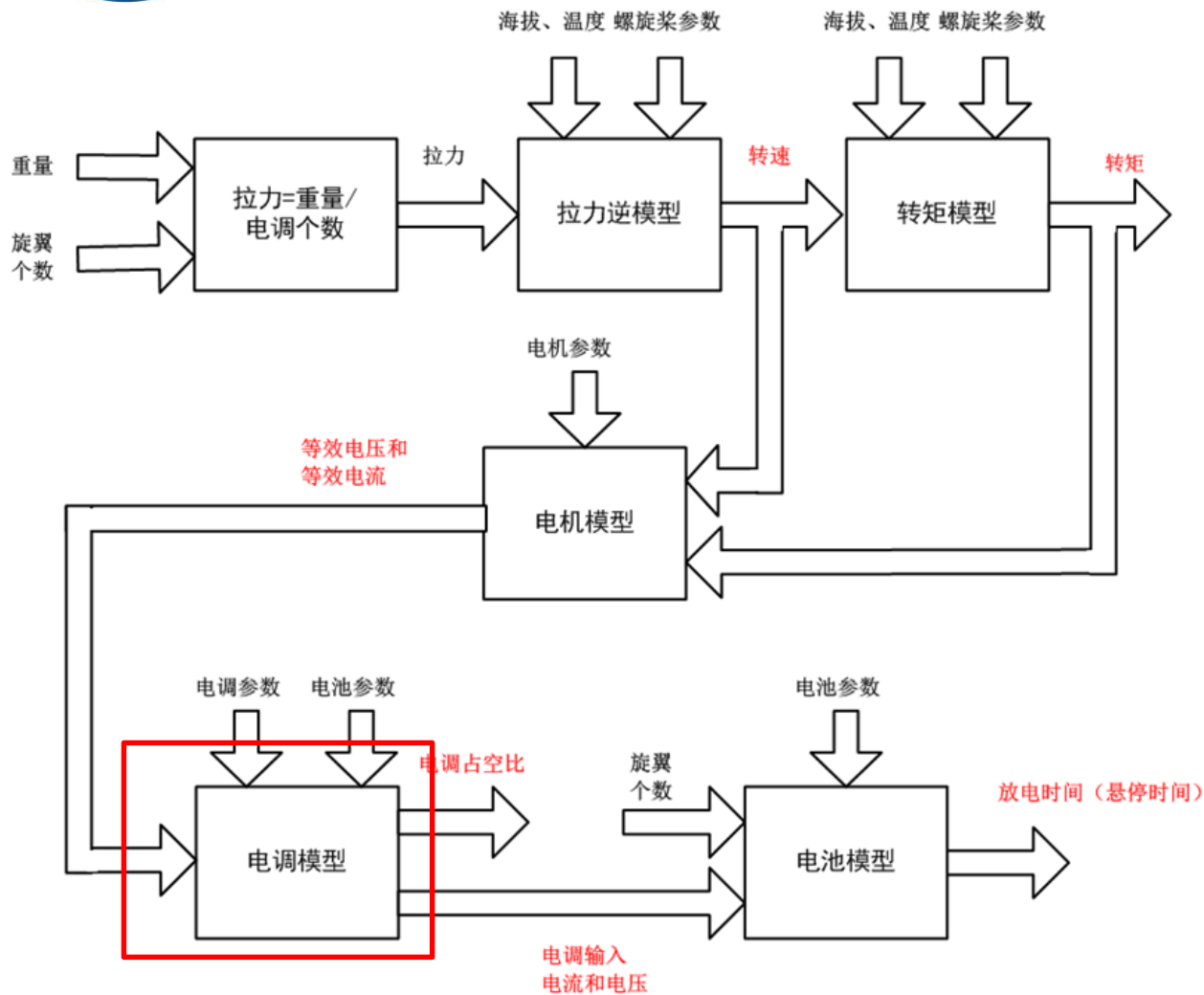
(3) 由电机模型计算电机的等效电流和等效电压, 由式 (4.10) 得到

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

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



分析实验



(5) 由式(4.13)
得电调输入油门
指令

由式(4.14)
电调输入电流:

由式(4.16)得
电调输入电压:

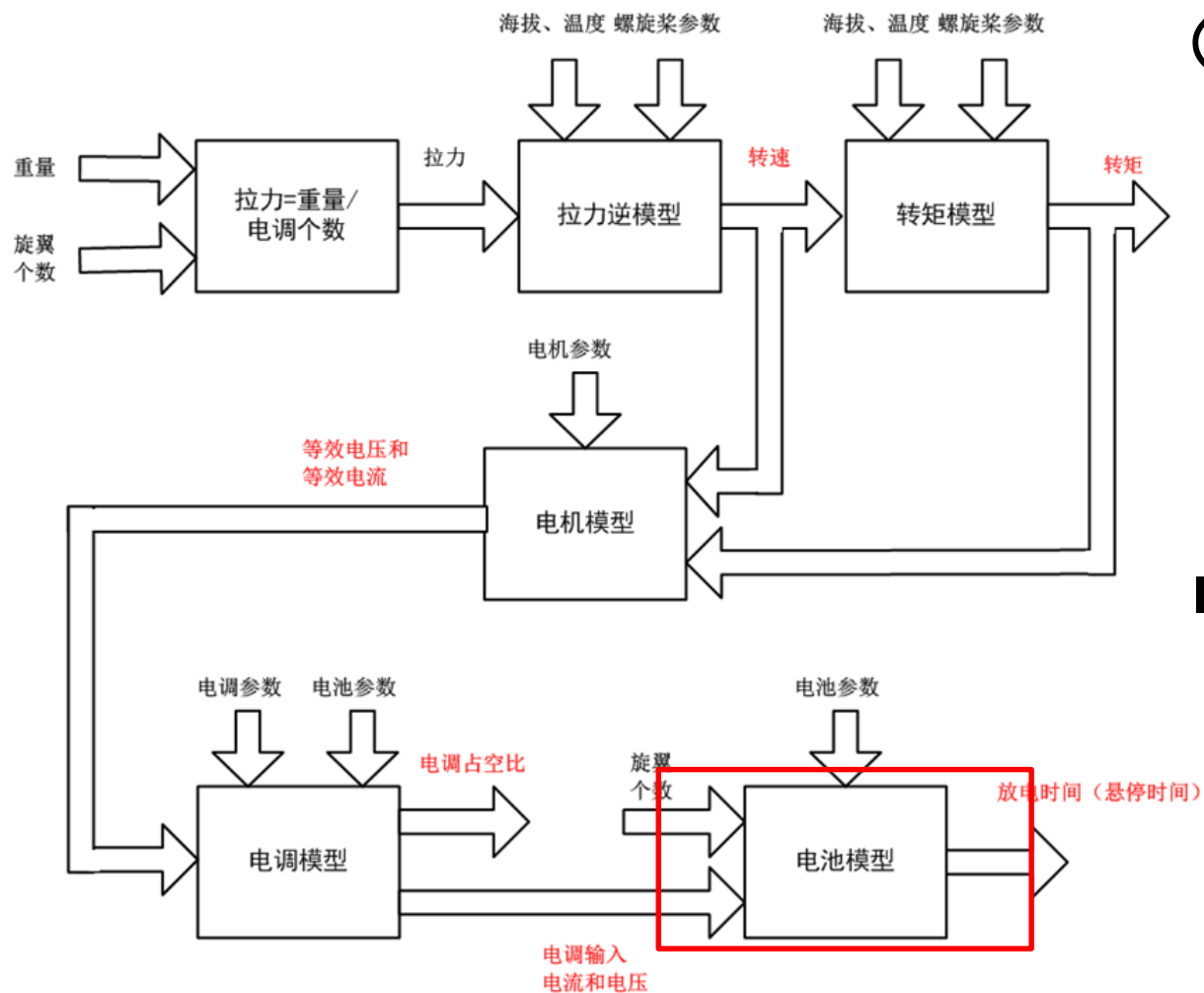
$$\sigma = \frac{U_m + I_m R_e}{U_b} = \frac{6.327 + 6.708 * 0.008}{12} = 0.532$$

$$I_e = \sigma I_m = 0.532 * 6.708 = 3.567 A$$

$$U_e = U_b - I_b R_b = 12 - 14.768 * 0.0084 = 11.876 V$$



分析实验



(6) 根据电池容量和电池电流就算悬停时间。

■ 由式 (4.17)

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

得电池电流:

■ 最小容量取为总容量的15%，由式 (4.22) 求得悬停时间为:

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









分析实验

□ 目标1实验步骤

(7) 使用网站验证计算

在网站上进行相同配置后得出的飞行参数和性能如右图。

	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1实验步骤

基本信息



(7) 使用网站验证计算

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



理论计算时间与网站上计算时间一致！



分析实验

□ 目标2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 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2实验步骤

(1) 海拔影响：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2实验步骤

(2) 温度影响，考虑温度对悬停时间的影响

表. 温度对悬停时间的影响

温度/°C	悬停时间/min
0	17.1
10	16.9
20	16.6
30	16.4
40	16.2

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3实验步骤

(1) 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3实验步骤

(2) 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	21.4
四轴八旋翼	19.8
六旋翼	19.4
四旋翼	16.5
三轴六旋翼	17.8
三旋翼	14.5

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

<http://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.

及网上的动力单元信息

■ 目标

海拔0m, 温度25° C, 设计一架多旋翼飞行器, 载重1kg, 外界圆半径小于1m, 总体重量小于5kg, 悬停时间大于15min。需要完成: 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, <http://flyeval.com/paper>截图说明选择的合理性。



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) 选择设计**四旋翼**

(2) 根据总重量确定单个螺旋桨的拉力，由式 (4.24) 得：

$$T = \frac{5}{4} = 1.25\text{kg}$$

(3) 根据飞行器的最大尺寸限制，确定螺旋桨的最大尺寸

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

考虑一定裕度，螺旋桨最大尺寸范围为：

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

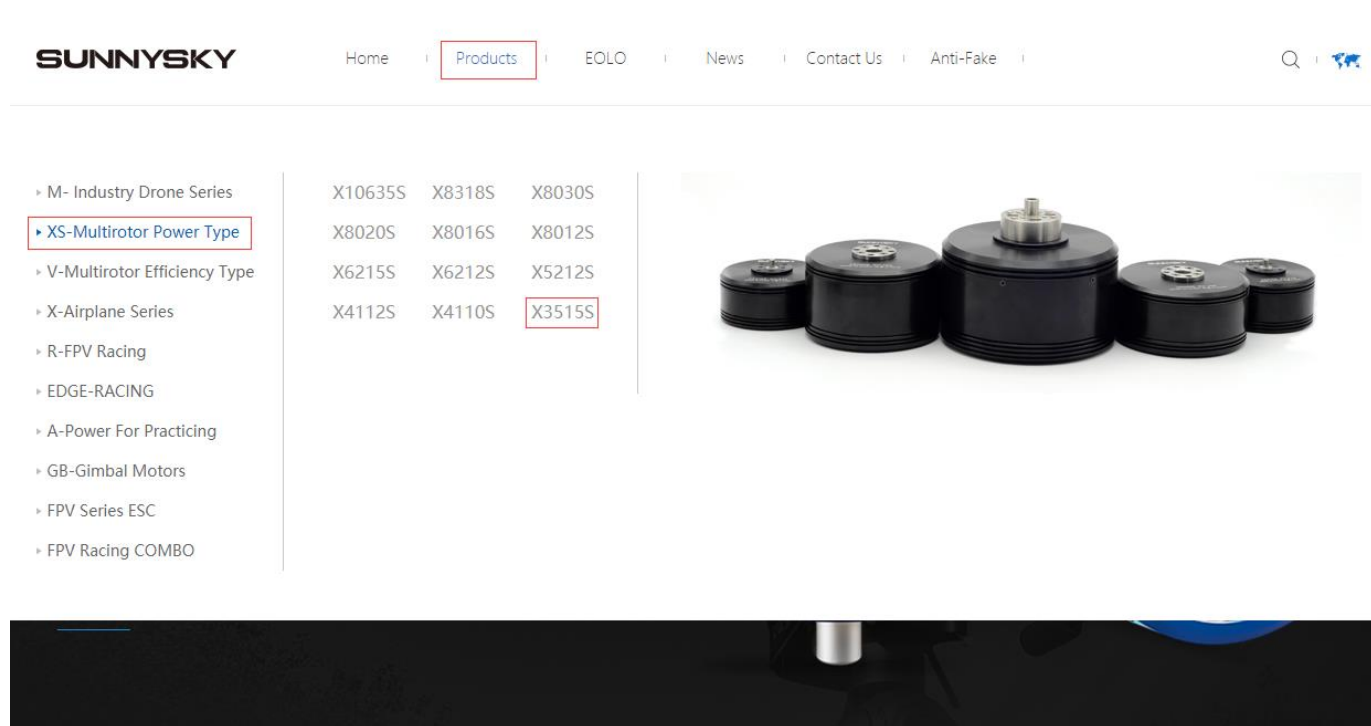
螺旋桨尺寸一般用直径表示，且单位为英寸，转换得螺旋最大尺寸在23.1~27.2英寸之间



设计实验

□ 实验步骤

(4) 寻找合适的电机，比如SUNNYSKY电机，<http://www.rcsunnysky.com/>





设计实验

□ 实验步骤

SUNNYSKY GREAT PERFORMANCE WITH COMPETITIVE PRICE		
Specifications	X3515S KV400	推荐多旋翼重量 $\ll 1700\text{g}$
ESC	建议使用电调	40-60A
Recommended Prop(inch)	推荐螺旋桨规格	14*4.7 15*5.5
		16*6

- 推荐单轴起飞重量 <math>< 1.7\text{kg}</math>
- 推荐螺旋桨尺寸有 14*4.7、15*5.5、16*6 均符合设计要求。
- 同时官方推荐电调 40~60A，最大连续电流 35A，可以用来作为选择电调和电池的参考。



设计实验

□ 实验步骤

螺旋桨尺寸	电压 (V)	78°C		5min 100°C
		电流 (A)	重量 (kg)	
16*6	2.1	500	46.62	10.72501073
	3.5	750	77.7	9.652509653
	5.1	1000	112.22	8.832361774
	6.9	1250	153.18	8.160334247
	9	1500	199.8	7.507507508
	11	1750	244.2	7.166257166
	13.2	2000	293.04	6.825006825
	16.3	2300	361.86	6.356049301
	19.6	2600	435.12	5.975363118
	24.5	3000	543.9	5.515719801
	28.6	3360	634.92	5.292005292
	2	500	50	10
	3.2	750	80	9.375
	4.6	1000	115	8.695652174
6.3	1250	157.5	7.936507937	
7.9	1500	197.5	7.594936709	
10	1750	250	7	
12	2000	300	6.666666667	
14.9	2300	372.5	6.174496644	
18	2600	450	5.777777778	
22.8	3000	570	5.263157895	
29.3	3500	732.5	4.778156997	
30.1	3600	752.5	4.784053156	

- 我们选择螺旋桨尺寸为16*6，电压22.2V，电流为6.9A即可达到起飞重量1.25kg要求，
- 电流19.6A可达到2.6kg, 符合要求。



设计实验

□ 实验步骤

(5) 寻找合适的电调，比如HOBBYWING电调，http://www.hobbywing.com/cn/search_list.php

当前位置:首页 > 无人机动动力系统 > XRotor PRO 50A

XRotor PRO 50A

产品概览 **技术参数** 技术支持 推荐配件 产品细节图

技术参数

产品名称 XRotor Pro 50A

产品编号 30902052

基本参数 **持续/峰值电流** 50A/70A

电池节数 4-6S LiPo

BEC输出 无

线材及插头 电源线 红色-14AWG-400mm*1/黑色-14AWG-400mm*1

输出线 黑色-14AWG-75mm*3

电源插头 无插头

输出插头 3.5金插(母)

备注: 以上所有线材长度皆为原材料线材长度, 而不是实际露在电调外部的线材长度, 实际电调外露长度会比所标值稍短。

持续电流50A，最大电流

70A。符合要求。



设计实验

□ 实验步骤

(6) 选择合适的螺旋桨。比如APC螺旋桨，<https://www.apcprop.com/>。



E-MAIL A FRIEND

Product Code: LP16060

16x6

\$14.99

Sport

Pitch (inches)	6
Propeller Diameter (in.)	16
Hub Diameter	1.25 in.
Hub Thickness	0.57 in.
Shaft Diameter	5/16 in.
Product Weight	3.17 oz.
Color	GREY

尺寸符合要求。



设计实验

□ 实验步骤

(7) 由电机的参数可知，悬停时电机电流为6.9A，考虑一定的损耗，预估电池放电电流为 $7.0 \times 4 = 28A$ ，最低容量为总容量15%。若悬停时间定为最低的15min，由式(4.22)得电池容量最小为：

$$C_b = T_b I_b / 0.06 / 0.85 = 15 * 28 / 0.06 / 0.85 = 8235mAh$$

若选择格式电池，其高压版满足电机的电压需求。

可以看到三种电池容量均符合要求。

如选择格式TATTU16000mAh 15C 22.8V电池，

悬停时间为：

$$T = \frac{C_b - C_{\min}}{I_b} \cdot \frac{60}{1000} = \frac{0.85 * 16000}{28} * 0.06 = 29.1 \text{ min}$$

电池产品库 BATTERY

定制电池

电池配件

聚合物锂电池

无人机电池

TATTU FPV 无人机电池

TATTU FPV 无人机电池R-line系列

TATTU FPV 无人机电池通用系列

TATTU 无人机电池智能版

TATTU 无人机电池通用版

TATTU 无人机电池高压版

航模电池

航模动力电池

航模遥控器电池

车模电池



Tattu无人机植保电池_22000mAh 25C 22.8V 高压版

TIME:2016-12-29

产品名称: Tattu无人机植保电池_22000mAh 25C 22.8V 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: 裸线 充电插头: JST-XHR-7P反向+AB扣 充电线号及线...



Tattu无人机航拍电池_16000mAh 15C 22.8V 高压版

TIME:2016-12-29

产品名称: Tattu无人机航拍电池_16000mAh 15C 22.8V 高压版 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: 1980g 放电插头: 裸线 充电插头: JST-XHR-7P反向+AB扣 充电线号及...



Tattu无人机植保电池_12000mAh 25C 22.8V 高压系列电池

TIME:2016-12-29

产品名称: Tattu无人机植保电池_12000mAh 25C 22.8V 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: 裸线 充电插头: JST-XHR-7P反向+AB扣 充电线号...



北航可靠飞行控制研究组

BUAA Reliable Flight Control Group



设计实验

□ 实验步骤

(8) 根据螺旋桨尺寸重新计算多旋翼轴距。

$$2R = \frac{r_p}{\sin \frac{\theta}{2}} = \frac{16 * 25.4}{\sin \frac{180}{4}} = 575\text{mm}$$

增加一点裕度：取轴距=575*1.1=632mm, 选择轴距为650mm.



设计实验

□ 实验步骤

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

	整机重量 (↑) <input type="text" value="5"/> kg	机架轴距 <input type="text" value="650"/> mm	飞行海拔 <input type="text" value="0"/> m	空气温度 <input type="text" value="25"/> °C	外形气动 <input type="text" value="一般"/>	
	电池放电下限 <input type="text" value="15%"/>	安全起飞油门上限 <input type="text" value="85%"/>	飞控最大倾角 <input type="text" value="无限制"/>	飞控&附件电流 <input type="text" value="0.5"/> A		
	电机品牌: <input type="text" value="*自定义.."/>					
	KV值 (转每分/电压) <input type="text" value="400"/> rpm/V	空载电流 - 电压 <input type="text" value="0.7"/> A - <input type="text" value="22.2"/> V	最大持续电流(10s) <input type="text" value="35"/> A	内阻 <input type="text" value="115"/> mΩ	外直径 <input type="text" value="35"/> mm	重量 (*选填) <input type="text" value="170"/> g
	螺旋桨品牌 <input type="text" value="APC"/>		型号 <input type="text" value="16x6"/>			
	电调品牌 <input type="text" value="Hobbywing (好盈)"/>		型号 <input type="text" value="XRotor 50A"/>			
	电池品牌 <input type="text" value="ACE (格氏电池)"/>		型号 <input type="text" value="LiPo TATTU Plus 6S-22.2V-15C-..."/>		电池串联-并联组合 <input type="text" value="1"/> S <input type="text" value="1"/> P	



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	: 24.7 min.
油门百分比	: 52.7 %
电调电流	: 8.15 A
电机转速	: 4180 rpm
电机输出功率	: 155.3 W
电池输出电压	: 23.7 V
电池输出电流	: 33.1 A
能量效率	: 78.2 %

最大油门性能：

飞行时间	: 5.1 min.
总升力	: 128.9 N
电机电流	: 39.9 A
电机转速	: 6779.7 rpm
电机输出功率	: 662.7 W
电池输出电压	: 22.5 V
电池输出电流	: 159.7 A
能量效率	: 69.1 %

整体性能：

正常使用	: 18.3 min.
整机重量	: 5 kg
剩余载重	: 5.44 kg
最大起飞海拔	: 5.79 km
最大倾斜角度	: 61.4 °
最大平飞速度	: 18 m/s
单程飞行距离	: 9.67 km
抗风等级	: 6 级



小结

(1) 我们设计的在线性能评估网站<http://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达到悬停时间、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。同时可以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。



资源

(1) 关于**线上线下课程**相关信息:

<http://rfly.buaa.edu.cn/course.html>

(2) 课程讨论区

<https://flyeval.com/forum>

(3) 关注可靠飞行控制研究组公众号 **buaarfly**





谢 谢!