

doi: 10.7690/bgzdh.2018.03.017

2 kg 以内起飞质量的无人机超长续航策略

贺明飞¹, 李卫国², 陈晨³, 崔云凯¹, 刘冠廷¹

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古工业大学工程训练中心, 呼和浩特 010051; 3. 杨凌职业技术学院药物与化工分院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 根据 2016 中国机器人大赛空中机器人组无人机续航挑战赛项目规则, 提出一种新型电动无人机超长续航策略。依据“大马拉小车”的原理, 设计更高效能的螺旋桨驱动系统、更高能量密度的电池组以及降低结构质量所占比例的方案, 选取更为优化的材料与结构和制造工艺, 采用 SolidWorks 3 维建模软件进行仿真, 并通过多次实验验证。实验结果表明: 该策略能大幅提升无人机续航时间, 有效解决目前电动无人机续航时间短的难题, 为电动无人机的设计制造及在更广范围内的应用提供参考。

关键词: 2016 中国机器人大赛; 电动无人机; 超长续航; 螺旋桨驱动系统; 高能量密度电池

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A

An Ultra-long Range Strategy for Unmanned Aerial Vehicles (UAV) with Less-than-2 kg Take-off Weight

He Mingfei¹, Li Weiguo², Chen Chen³, Cui Yunkai¹, Liu Guanting¹

(1. School of Energy & Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;
2. Engineering Training Center, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;
3. School of Chemical Engineering, Yangling Vocational & Technical College, Yangling 712100, China)

Abstract: Based on the UAV Range Challenge, Aerial Robot Team of the 2016 Robocup China, the thesis puts forward a new ultra-long range strategy for electric UAVs. In order to meet the requirements of the contest and address the problem between the range of multi-rotor UAVs and their take-off weight, we design better screw drive system, high-energy density battery pack and a proposal to reduce the proportion of structure weight in accordance with the principle of a big horse drawing a small cart. We have used better materials, structure and manufacturing technique, simulated with SolidWorks and conducted experiments and comparison tests, the results which indicated that the strategy had greatly increased UAVs' flight range. In this way, we have addressed the issue of short range of electric UAVs, providing reference for their design, manufacturing and application in a wider scope.

Keywords: 2016 Robocup China; electric UAV; ultra-long range; screw drive system; high energy density battery

0 引言

近年来, 随着飞控导航技术的成熟以及市场的快速发展, 以多旋翼为代表的小型电动无人机一度走俏, 其发展成果令人瞩目。其中以深圳大疆创新科技有限公司为代表, 9 年时间就占领了消费级无人机全球 70% 的市场份额。但续航时间是现阶段多旋翼电动无人机进一步发展和更广范围应用的瓶颈, 目前大多数多旋翼电动无人机的续航时间在 12~30 min 之间, 如大疆 (DJI) 最新产品 MAVIC PRO 质量 0.743 kg (毛重 4.35 kg), 最长续航时间仅 27 min; XIRO 零度无人机探索者 XPLOER-G 质量 1.189 kg, 飞行时间仅 18 min。大多数 2 kg 以内起飞质量小型无人机飞行时间不超过 30 min。如果搭载巡航、勘测等功能其续航时间将大幅缩减, 若能提升这些无人机的续航时间将会有更为广阔的发展空间。

中国机器人大赛 (原中国机器人大赛暨 RoboCup 中国公开赛) 从 1999 年首次举办, 到 2016 年已连续举办了 18 届, 是中国自动化学会的一项重要工作^[1-2]。大赛组委会针对无人机续航的技术难点设立了空中机器人组无人机续航挑战项目。为提高小型电动无人机续航飞行时间, 笔者提出一种新型电动无人机超长续航策略, 从无人机结构设计、材料选取、制造工艺改良、动力系统优化、高能量密度电池设计制造等方面设计制造了参赛无人机, 并优化各系统。

1 无人机续航挑战项目简介^[3]

1.1 比赛场地及器材

比赛场地设置在室外。比赛时空中机器人的飞行高度不得高于 2 m, 不得低于 1 m。参赛队一字排开, 2 个飞行器之间保持 10 m 以上距离。

收稿日期: 2017-11-28; 修回日期: 2017-12-20

作者简介: 贺明飞 (1996—), 男, 陕西人, 本科, 从事人工智能、机器人设计与制造、自动化、新能源科学与工程研究。

1.2 无人机要求

空中机器人起飞质量不大于 2 kg。可安装自动驾驶系统自动悬停，但必须能切换到遥控模式，能手动起飞和降落。

驱动旋翼的动力必须是电动机，且提供升力的螺旋桨数量必须大于等于 4 个。

1.3 评分标准

起飞指令发出后，参赛队的机器人必须在 3 s 内起飞。从起飞指令发出后开始计时，直到参赛机器人降落时结束计时，持续飞行的时间计入成绩。

2 项目策略

2.1 飞行器设计

经认真研究大赛规则之后，笔者决定采用结构更为简单直观的四旋翼无人机。笔者参考国内外高校和多家研究中心的相关研究^[4-12]，采用如图 1 所示的设计。该设计采用对称性极高的机械结构，使得无人机的重心保持在其几何中心处。其飞行原理：由飞行控制器采集飞行数据，通过数据融合算法控制各个电机的转速，从而控制飞行器姿态稳定并按一定方向航行^[13]。

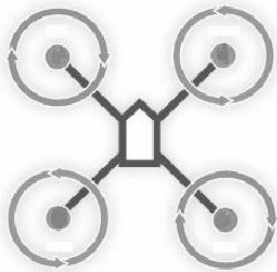


图 1 设计原理

根据此原理，采用模块化设计原理(如图 2)，

将无人机的机械结构设计为一体化，轴距 555 mm。中心板由 2 块互相平行的八边形板构成，以其几何中心为中心对称点，铣出 4 个相同的等边三角形用于减轻质量并增加稳定性，将 4 个机臂包围在 2 块中心板之间形成统一完整的机架。依据平行四边形结构特点，在中心板上设计了 2 块形状完全相同、尺寸具有特定差异的飞行控制器减震板。在飞控表面贴上锡纸以防止外来信号干扰，将 GPS 定位系统用尼龙柱安装在飞控表面的锡纸上。将电池直接用魔术贴粘在中心板底下并作为飞机起飞的“脚架”。



图 2 模块化设计原理

这样的设计做到了极限减重，但并没有影响飞机的稳定性，GPS 定位系统和飞行控制系统的信号不会产生干扰。

2.2 材料及其制造工艺

受限于大赛对无人机质量的要求，要达到无人机结构的轻质化和高性能化，在机架材质的选取要十分慎重。经过多方对比测试(如表 1)，笔者最终选取碳纤维材料。与传统的金属材料及复合材料相比，碳纤维复合材料具有轻质高强、抗疲劳和防盐雾侵蚀的特性，将其应用于无人机结构中可以改善和提高无人机的综合性能^[14]。加工完成后的机构配件如图 3。

表 1 无人机使用材料的比刚度和比强度比较

材料	密度/(g•cm ⁻³)	抗张强度×10 ³ /MPa	弹性模量×10 ⁵ /MPa	比强度×10 ⁷ /cm	比模量×10 ⁹ /cm
玻璃钢	2.00	1.06	0.40	0.53	0.20
铝合金	2.80	0.47	0.75	0.17	0.26
钛合金	4.50	0.96	1.14	0.21	0.25
碳纤维/I 环氧复合材料	1.60	1.07	2.40	0.67	1.50
碳纤维/II 环氧复合材料	1.45	1.50	1.40	1.03	0.97

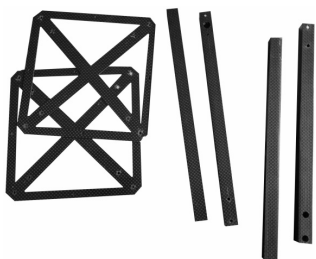


图 3 机架配件

机臂为 1.5 mm 厚的碳纤维空心方管，摒弃电机座，直接在机臂一端打孔与电机采用螺栓连接，机臂另一端两侧用多功能强力胶粘上之后采用铆钉连接。飞行控制器减震板用海绵胶粘在中心板表面，既能起到连接的作用又能减震。电子调速器用多功能强力胶粘在机臂上用扎带固定，其他线路均采用锡焊方式连接。

2.3 动力系统优化

动力系统包括电机、电调、电池、螺旋桨的选择。根据项目的要求,笔者在优先考虑拉力功率比的基础上选择其他配置,结合经验和技术积累最终确定配置如表 2。

表 2 动力系统配置

配件	型号	规格	数量
电机	Crazy motor-4108	Kv400	4
电调	TM-AIR	40 A	4
螺旋桨	飞越-1	15 寸	2
电池	自制 18650 电池组	24 V	1
飞行控制器	Pixhawk	高配版	1

动力系统选择 kV 值为 400 的 crazy motor-4108 盘式电机,提供强劲动力的同时也能做到极大程度上的省电。选择 TM-AIR 40A 电子调速器进行精确调速,使得动力系统更为稳定。笔者参考文献[15-16]给出的旋翼实验数据并经多次实验测试,最终选择飞越-1 高效碳纤维螺旋桨,效率更能与此套动力相匹配。电池容量的大小直接决定无人机续航时间长短,笔者采用点焊技术自制 18650 高能量密度电池,单节放电测试如图 4 所示。

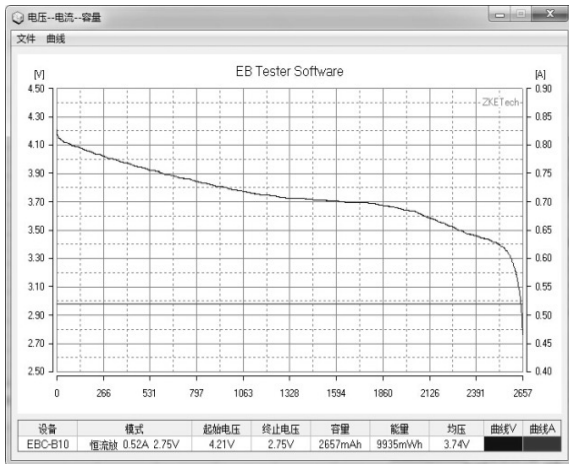


图 4 18650 高能量密度电池单节放电测试

笔者根据设计原理制作电池组(如图 5),容量可达 25 000 mAh,以 30 C 的放电倍率运行,与动力系统相匹配,为超长续航打下坚实的基础。

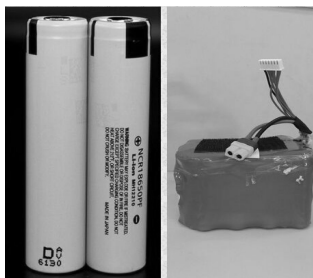


图 5 自制高能量密度电池

笔者采用 Pixhawk 高配版飞行控制器,利用 PID 经典算法(包含 3 个控制算法),与采用内置电子罗盘和外置 GPS 的内部算法配合,不断地对其飞行姿态进行优化与改造,大大提升其鲁棒性,使该无人机更加稳定。笔者根据质心运动定理和欧拉动力学方程,建立三轴动力平衡方程式和绕三轴方向的力矩平衡方程^[17]如下:

$$\left. \begin{aligned} m \left(\frac{du}{dt} + wq - vr \right) &= \sum F_{xb} \\ m \left(\frac{dv}{dt} + ur - wq \right) &= \sum F_{yb} \\ m \left(\frac{dw}{dt} + vp - uq \right) &= \sum F_{zb} \\ I_x \frac{dp}{dt} - (I_y - I_z)qr &= \sum M_{xb} \\ I_y \frac{dq}{dt} - (I_z - I_x)rp &= \sum M_{yb} \\ I_z \frac{dr}{dt} - (I_x - I_y)pq &= \sum M_{zb} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中: $\sum F_{xb}, \sum F_{yb}, \sum F_{zb}$ 为沿机体坐标系下三轴方向的合外力; $\sum M_{xb}, \sum M_{yb}, \sum M_{zb}$ 为绕机体坐标系下三轴方向的合外力矩; p, q, r 分别为机体坐标系下的三轴角速度; u, v, w 分别为机体坐标系下的三轴方向的线速度。若近似的将无人机相对 $y_b o_b z_b$ 平面和 $x_b o_b z_b$ 平面相互对称,则可得如下转动惯量积^[18]:

$$I_{xy} = I_{yz} = I_{zx} = 0。$$

以此为依据,笔者在飞行控制器中,以 PID 经典算法为基础,自创如下任务执行算法:

//位置计算任务

```
const uint8_t POS_CALC_TASK_PRIO = 4;
const uint32_t POS_CALC_TASK_SIZE = 512;
void PosCalcTask(void *p_arg);
__align(8) OS_STK PosCalcTaskSTK
[POS_CALC_TASK_SIZE];
```

//动作任务

```
const uint8_t ACTION_TASK_PRIO = 5;
const uint32_t ACTION_TASK_SIZE = 2048;
void ActionTask(void *p_arg);
__align(8) OS_STK ActionTaskSTK
[ACTION_TASK_SIZE];
```

//蜂鸣器任务

```
const uint8_t BUZZER_TASK_PRIO = 6;
const uint32_t BUZZER_TASK_SIZE = 128;
void BuzzerTask(void *p_arg);
```

```

OS_STK BuzzerTaskSTK
[BUZZER_TASK_SIZE];
//自检任务
const uint8_t SELF_TEST_TASK_PRIO = 7;
const uint32_t SELF_TEST_TASK_SIZE =
1024;
void SelfTestTask(void * p_arg);
__align(8) OS_STK SelfTestTaskSTK
[SELF_TEST_TASK_SIZE];
//主任务
const uint8_t MAIN_TASK_PRIO = 8;
const uint32_t MAIN_TASK_SIZE = 2048;
void MainTask(void *p_arg);
__align(8) OS_STK MainTaskSTK
[MAIN_TASK_SIZE];
//重启任务
const uint8_t RESTART_TASK_PRIO = 9;
const uint32_t RESTART_TASK_SIZE = 1024;
void RestartTask(void * p_arg);
__align(8) OS_STK RestartTaskSTK

```

```

[RESTART_TASK_SIZE];
//路径控制任务
const uint8_t RUN_TASK_PRIO = 10;
const uint32_t RUN_TASK_SIZE = 2048;
void RunTask(void *p_arg);
__align(8) OS_STK RunTaskSTK
[RUN_TASK_SIZE];
//手动任务
const uint8_t MANUAL_TASK_PRIO = 11;
const uint32_t MANUAL_TASK_SIZE = 512;
void ManualTask(void * p_arg);
__align(8) OS_STK ManualTaskSTK
[MANUAL_TASK_SIZE];
//起始任务
const uint8_t START_TASK_PRIO = 15;
const uint32_t START_TASK_SIZE = 512;
void StartTask(void * p_arg);
OS_STK StartTaskSTK[START_TASK_SIZE];

```

术参数如表 3。

表 3 动力系统技术参数

电压/V	测试桨形	油门/%	拉力/kg	电流/A	功率/W	效率/(G/W)
16	1555	40	0.20	1.30	21	9.50
		50	0.43	3.00	48	9.00
		60	0.61	4.10	72	8.50
		70	0.81	6.00	100	8.10
		80	1.02	8.40	135	7.60
		90	1.25	11.30	180	6.90
		100	1.29	12.10	194	6.60
22.2	1555	40	0.53	8.66	58.6	9.00
		50	0.80	4.71	104	7.70
		60	1.10	7.10	157	7.00
		70	1.42	10.41	228	6.20
		80	1.74	14.02	311	5.60
		90	2.00	17.60	390	5.10
		100	2.04	18.75	413	4.90

2.4 系统整体优化

在机架和动力系统全部装载完成后，无人机整机如图 6，加上控制系统总质量为 1 964.5 g，符合项目要求。



图 6 整机

控制系统包括 Pixhawk 开源飞行控制器、天地飞 9 通道 2.4 GHz 遥控器(含接收机)、m8nGPSmo 模块，在 GPS 模块上加上太盟 cirocomm 北斗 GPS 无源天线增强信号。笔者结合 Saridis 教授的分层递阶方法及仿人智能控制思想^[19]，在开源飞控中设计编写代码以完成自主飞行和精准定点、定位。

3 对比分析

对比国内外 2 kg 以内的无人机续航时间(如表 4)，大多数无人机续航时间都在 25 min 左右，而笔者这款无人机总质量为 1 964.5 g，平均续航时间可达 106 min，约为市面上常见无人机续航时间的 4 倍。

表 4 国内外相关无人机续航时间对比

产品	公司	总部	质量/g	续航时间/min
大疆 Phantom 4	深圳市大疆创新科技有限公司	中国深圳	1 388	约 30
探索者 2 代	深圳零度智能飞行器有限公司	中国深圳	995	约 25
Parrot Disco	Parrot	法国巴黎	754	约 45
X-Star Premium	Auter Robotics	美国	1 420	约 25
3D Robottics IRIS+	3D Robottics	美国	1 282	约 18
Lily Camera	Lily Robotics	美国	1 300	约 20

4 策略的优缺点分析

根据大赛组委会的要求, 笔者借鉴分层递阶思想及仿人智能控制思想自主设计编写了 Pixhawk 开源飞行控制器自主飞行的代码, 将该套自主飞行控制系统按照文献[20]原理, 在 Matlab 软件中利用有限状态机图形实现工具 Stateflow 进行仿真。仿真实验结果表明, 此套系统可以实现自主飞行。在实际测试中以 10 次实验为一组, 最长续航时间 116.8 min, 平均续航时间 106.7 min, 并在 2016 中国机器人大赛空中机器人项目无人机续航挑战赛项目中取得一等奖。

由于空气气流、温度、湿度和 GPS 信号强弱等因素的影响, 使实验结果有波动。该无人机在防水、空气流体力学和空气动力学等方面, 还有待进一步研究。

5 结束语

笔者从飞行器设计、材料与结构、制造工艺、动力系统优化、先进电池、技术等方面设计制造了参赛无人机, 并优化各个系统, 使得该无人机在续航时间上有了重大突破, 但在自主飞行中 GPS 导航还有待加强, 对视觉导航还应做进一步研究。

参考文献:

- [1] 中国自动化学会. 2016 中国机器人大赛简介[Z]. 长沙: 中国自动化学会, 2016: 1-2.
- [2] <http://crc.drct-caa.org.cn/>[Z]. 2016.
- [3] 2016 中国机器人大赛空中机器人项目技术委员会. 2016 中国机器人大赛简介比赛规则空中机器人项目无人机续航挑战项目[Z]. 长沙: 中国自动化学会, 2016: 3-4.
- [4] ALTUG E, OSTROWSKI J P, TAYLOR C J. Quadrotor control using dual camera visual feedback[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 4294-4299.
- [5] VALENTI M, BETHKE B, FIORE G, et al. Indoor multi-vehicle flight testbed for fault detection, and recovery [C]//Proceedings of the AIAA Guidance,

Navigation and Control Conference and Exhibit. Rerton, VA, USA: AIAA, 2006: 3-4.

- [6] BOUBDALLAH S, SIEGWART R. Full control of a quadrotor[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 153-158.
- [7] POUNDS P, MAHONY R, CORK P. Modelling and control of a large quadrotor eobot[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(7): 691-699.
- [8] HOFFMANN G M, HUANG H M, WASLANDER S L, et al. Precision flight control for a multi-vehicle quadrotor helicopter testbed[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(9): 1023-1036.
- [9] ALEXIS K, NIKOLAKOPOULOS G, TZES A. Switching model predictive attitude control for a quadrotor helicopter subject to atmospheric disturbances[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(10): 1195-1207.
- [10] 宋建宇. 无人机的飞行辅助方法和系统、无人机和移动终端[P]. 深圳市大疆创新科技有限公司, 2016.
- [11] 杨建军, 杨霖. 无人机、无人机飞行控制方法及装置[P]. 零度智控(北京)智能科技有限公司, 2016.
- [12] 高鹏, 张利军, 李玉刚. 无人机的飞行控制方法、装置和无人机[P]. 北京博瑞爱飞科技发展有限公司, 2016.
- [13] 毛柏源. 多旋翼无人飞行器关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016: 36-70.
- [14] JOHN K B. Unmanned aerial vehicles spur composites use[J]. Reinforced Plastics, 2004, 48(4): 28-31.
- [15] BRANDT J B, DETERS R, ANANDA G K, et al. UIUC propeller data site [EB/OL]. <http://m-selig.ae.illinois.edu/piops/volume-1/propDB-vol1-me-1.html>, 2015-03-02.
- [16] DETERS R W, ANANDA G K, SELIG M S. Reynolds number effects on the performance of small-scale propellers[J]. Aiaa Journal, 2000, 24(4): 4-6.
- [17] 孙世贤, 黄圳圭. 理论力学教程[M]. 长沙: 国防科技大学, 1997: 36-81.
- [18] 薛伟霖. 四旋翼无人机姿态控制的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016: 2-4.
- [19] 张立珍. 无人机自主飞行控制系统的设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011: 3-4.
- [20] 潘虎. Simulink/Stateflow 组态开发和仿真原理的分析与研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011: 21-60.