

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106327

模块化低空长航时无人机的设计与实现^{*}

华厚强

(中国民用航空飞行学院 航空工程学院 广汉 618307)

摘要: 将无人机用于航空摄影测量和数字低空遥感,具有作业成本低、高效灵活和适用范围广等特点。通过选择有较好降阻、减重、增大强度的机身和主翼,计算出等功率情况下上升、起飞、巡航段最优配比的电机和螺旋桨,优先选择动力与安全性较高的金属舵机作为伺服器,慎重筛选电子调速器、起落架、飞控、图传发射机、地面接收机等部件,集成设计出一款较优化的模块化低空长航时无人机。为了减轻飞行平台重量、提高载重、延长飞行时间和距离,进行了大量的重复实验以选型,并进行了各种基础功能的测试。相对于传统飞行平台,该无人机飞行平台具备长航时和飞行距离远的特点,还可以搭载微型单反、下挂投放舱、气象探测器等更多的装备,与卫星链接可以轻松上传拍摄图像,与地面站连接可以一键建模。该无人机可以在各种场地手抛起飞、降落,支持额外配件进行弹射、滑跑、垂直起降,可以滑降、伞降,在应急抗震救灾、国土资源调查监测、数字城市和重大工程建设等方面具有广阔应用前景。

关键词: 无人机;模块化;长航时;低空遥感;航空遥感

中图分类号: TP73;V241 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Design and implementation of a modular low-altitude long-endurance UAV

Hua Houqiang

(Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: Unmanned aerial vehicles (UAVs) are used in aerial photogrammetry and digital low-altitude remote sensing, which has the characteristics of low operating cost, high efficiency and flexibility, and a wide range of applications. The fuselage and main wing with better drag reduction, weight loss and strength increase were selected, the motor and propeller with the optimal ratio in the ascending, takeoff and cruising segments under the same power condition were calculated, and the metal steering gear with higher power and safety was preferred as the servo. The electronic governor, landing gear, flight control, image transmitter, ground receiver and other components were carefully selected. So the optimized modular low-altitude long-endurance UAV was integrated. In order to reduce the weight of the flight platform, increase the load, extend the flight time and distance, a large number of repeated experiments were carried out to select the type, and various basic functions were tested. Compared with the traditional flight platform, the UAV flight platform has the characteristics of long flight time and long flight distance. It can also be equipped with more equipment such as miniature SLR, downhanging release cabin, weather detector, etc. The taken photos can be easily uploaded with the satellite link, and it can be modeled with one click when connected with the ground station. The UAV can take off by hand and land at various venues, support additional accessories for ejection, taxiing, vertical take-off and landing, and can slide down and parachute. It has broad application prospects in emergency earthquake relief, land and resources survey and monitoring, digital city and major engineering construction, etc.

Keywords: UAV; modularization; long-endurance; low-altitude remote sensing; aerial remote sensing

0 引言

2008年汶川地震、2010年舟曲泥石流和2017年吉林水灾等一次次的自然灾害使人们充分意识到,由于各种原

因,灾难中有一些位置人无法直接接触。将无人机用于测绘、遥感和远程巡查时,可以帮助人们在一些恶劣天气及人难以到达的区域进行作业,极大地提高工作效率,解放人力^[1-3]。将无人机用于航空摄影测量和数字低空遥感,具备

收稿日期:2021-04-08

^{*} 基金项目:中央高校教育教学改革专项基金项目(E2020014, E2020017)、民航局民航教育培训专项基金项目(14002600100017J172, 14002600100017J175)、中国民航飞行学院科研基金面上项目(J2015-17)资助

作业成本低、高效灵便和可应用领域广等特点。

多功能无人机飞行平台自问世以来,由于具有强大的功能扩展性,其发展方向和应用领域已有众多成果。基于多旋翼无人机飞行平台的侧向喷涂机构^[4],该飞行平台采用精度较高的陀螺仪,注重于平台姿态的保持从而极大地提高工作的精准度。北方工业大学现场总线技术及自动化实验室基于 Pixhawk 开源飞控系统开发出了一款简单高效的多旋翼无人机避障系统^[5]。中国民航大学计算机科学与技术学院开发实现了一种通过在无人机上搭载机载导航设备(如惯导、无线电导航系统、GPS 导航系统等)实现独立完成精确导航任务的导游管理系统^[6]。在国外由于通航行业的发展迅猛,在无人机领域发展速度相对较慢。以色列军方开发出体型小的云雀无人机观测系统,美国军方研发的全球鹰无人机主要被后方指挥中心用来监视既定目标和观察战场,或者引导空军执行轰炸任务^[7]。

日前在市场上流通的大量航拍、测绘或植保无人机等多为集成化极高的无人机,操作的简单化给人们提供了极大便利性,但同时也带来了较为致命的隐患^[8-14]。大量的无人机在遇到炸机、进水等故障时都无法拆块维修,只能直接返厂大修;而当遇到多部分受损严重时,只能直接报废无人机,这是无人机集成化程度过高时的缺陷。本文旨在设计一款降低集成化程度的无人机,把无人机模块化,在其发生故障时能够找到正确故障位置,便于模块换修,提高无人机的可利用率且降低维修成本。利用翼型的主要几何参数和气动特性,选择有较好降阻、减重、增大强度的实用机身和主翼,通过计算选择出等功率情况下上升、起飞、巡航段最优配比的电机和螺旋桨,优先选择动力与安全性较高的金属舵机作为伺服器,慎重筛选电子调速器、起落架、飞控、图传发射机、地面接收机等部件,集成设计出一款较优化的模块化低空长航时无人机。为了减轻飞行平台重量、提高载重、延长飞行时间和距离,进行大量的重复试飞实验以选型,力求达到兼顾较优的飞行效果与较高的性价比,并进行各种基础功能的测试以及一定拓展用途的研究开发。

1 总体设计方案

可以在基于无人机平台的航拍技术上面进行拓展来设计无人机。通过多次实时测验,调换不同功率的电调和不同型号的桨叶、机翼等各种硬件,筛选出降阻效果好、减重能力强以及结构外形更科学的无人机飞行平台。选用新升级的飞控 Arkbird Autopilot2.0 作为核心部件,集成其他如高清摄像头、图传发射机、地面接收机、空速计等部件设计出一款集灾害巡查、测绘和遥感功能于一体的无人机飞行平台,可用于一些人不容易到达的区域进行作业。

1.1 系统的功能要求

本文设计的模块化低空长航时无人机相对于传统飞行平台,功能上不仅可以搭载更多的装备,如微型单反、下挂投放舱、气象探测器等,与卫星链接轻松上传拍照图像,与

地面站连接一键建模;还可以在各地降落起飞、弹射、滑跑、手抛,起飞条件相对要求低,对场地的适应性更好,而其实用性大大增强,功用也更加全面。支持额外配件进行垂直起降,可以滑降、伞降,主要用于抗震救灾,探测地震对城市的伤害,寻找可营救伤者。无人机搭载防眩光摄像头、双发射天线与接收机,配有菱形平板天线以达到最大传输距离在单一方向达到最远距离,使用三叶草型天线作为副天线使其在近距离达到最佳全向传输效果。接收器的图像接收运用目标自动跟踪(automatic target tracking, ATT)自动全向跟踪云台实时捕捉飞行器方位,截取最大信息流达到最远的图像传播距离,地面使用 433 跳频信号增强技术,最大稳定可控距离达到 60 km,机载数传系统实时传输飞行器数据,飞控板集成屏幕菜单式(on screen display, OSD)数据叠加系统使飞行员可以实时查看飞行数据,使用双向电调达到动力回收,配合设计模块化飞机可以达到长航时、远距离,搭载各种装备,适应各种场地。

1.2 系统的组成及方案设计

本平台主要由大猎鹰机身、郎宇 2820-1400KV 电机、好盈大电流电调、图传发射机及地面站、全新升级的 Arkbird Autopilot2.0 飞控等部件组成。

大猎鹰是所选固定翼中性价比较高的一个,它最大的特点是以大型双尾翼撑无人机为原型,经过长时间反复试飞和修改优化各项参数而来,主要技术参数为:翼展 1 800 mm、机长 1 300 mm、重量 750 g、最大起飞重量 3.8 kg(推荐 3.0 kg 左右)、重心位置在主翼底部由计算机图形(computer graphics, CG)标示、材料为发泡聚苯乙烯混合塑料(foamed polystyrene-polyethylene blend plastics, EPO)发泡和碳纤。

飞控 Arkbird Autopilot2.0 作为系统核心部件,采用双 CPU 架构,带有高档的丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(acrylonitrile butadiene styrene, ABS)防阻燃材料外壳,集成了高清的 OSD 界面和自动天线追踪(auto antenna tracker, AAT)机载模块,带有全新的中英文菜单和地面站接口,方便用户操作与使用。

Arkbird Autopilot2.0 配有数字式高精度空速计,能测量飞机和空气的相对速度,与 GPS 地速的对地速度不同。要产生升力就必须有空速,空速不够还可能导致失速。传统飞控使用 GPS 定位时,顺风 and 侧风条件下空速无法达到要求时会导致失速,逆风条件下空速超过标准时会导致飞行时间不足的问题。对比传统飞控,此飞控有空速管,适合在顺风、逆风和侧风等各种情况下飞行而不会出现失速或飞行时间不足的问题。

2 无人机各模块选用设计情况

2.1 无人机机身机翼的设计

本设计中无人机机翼部分属于自主设计,通过计算机翼主要参数来选择布局型式和外型设计,确保制作机翼的

可行性和科学性。NACA(美国国家航空咨询委员会)4415机翼翼型的主要几何参数图可供参考,如图1所示^[15]。

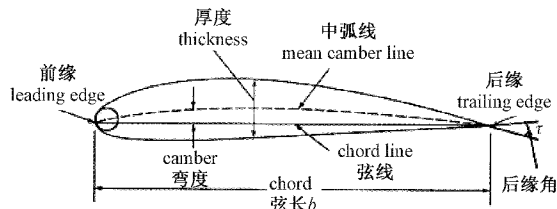


图1 机翼的主要几何参数

根据实际测量,本设计制作机翼翼长为1.92 m,弦长为0.23 m,厚度为0.024 m,弯度约为0.01 m。不妨将弦长用字母 b 表示,厚度用字母 t 表示,弯度用字母 h 表示,则机翼相对厚度为 $t' = t/b \times 100\%$,机翼相对弯度为 $h' = h/b \times 100\%$ 。

经计算,可得设计制作的机翼相对厚度为10.4%,相对弯度为4.3%。相对厚度和相对弯度都是影响翼型的主要参数。

翼型的主要几何参数计算完成后,还要考虑翼型的气动特性。升力系数是影响升力的一个关键因素,是飞机能够“飞”起来的最关键一环。要得到机翼所受的升力和阻力实际数据,需要对机翼进行正规的风洞试验,根据得到的风力大小和迎角大小计算出升力系数和阻力系数。由于实验条件的限制,无法测量升力和阻力,机翼的升力系数和阻力系数不能通过计算得到,只能根据计算所得相对厚度和相对弯度值对最大升力系数的影响判断飞机的气动特性。相对厚度在12%~18%之间时,飞机的最大升力系数最大,升力线斜率与翼型无关。相对弯度数值越大,升力线斜率越大。

2.2 飞控模块的选用

目前无人机飞控系统在市场上流通较多的为大疆无人机飞控系统、零度双子星双冗余安全飞控系统和智能多旋翼MINIX飞控系统。

大疆无人机飞控系统是大多数无人机爱好者的首选飞控,因为大疆无人机集成化程度高,操作便捷,利于人们使用。但由于公司市场问题考量,大疆的飞控系统很少单独出售,无获取渠道。零度双子星飞控系统功能也十分强大,甚至带有黑匣子功能,不需要任何外接存储设备,飞行时自动记录,但其高额的售价不符合本设计降低无人机成本的初衷,因此不是最佳选择。智能多旋翼MINIX飞控系统与零度双子星飞控系统功能相似,售价区别不大,同样不能作为本设计实用选择。

由于本设计考虑选择飞控系统以稳定性为主,Arkbird Autopilot2.0飞控系统有地面站并且稳定性较高,能自动连接ATT,可以有效避免飞行距离过远出现画面模糊情况,故选择性比较高的Arkbird Autopilot2.0飞控系统。但此飞控所存在的问题是无法直接显示航时和飞行距离,

部分飞行数据只能人工记录。某款可显示航程的飞控飞行数据如图2所示。由图2可以看出,该飞控在飞行距离仅21 km左右时拍摄画面就出现模糊情况。本文拟设计一款能降低成本且拍摄效果较好的无人机,因此选择使用具有无法直接显示航时和飞行距离缺憾的Arkbird2.0飞控系统。



图2 某飞控飞行21 km时拍摄画面图

2.3 动力与能源模块的选用

为了使动力模块对飞机主体的适应性强,本设计对无人机使用的动力模块进行了多次设计与调节。起始阶段使用了较为常规、廉价的新西达2212-1400KV无刷电动机配合新西达30 A无刷电调,经测试发现此动力配置不适用于大型远航无人机,且有一定的不稳定性(100~150 h的使用时间即出现故障),后选用郎宇2814-1100KV无刷电动机配合好赢40 A无刷电调,在测试中发现此套动力无法达到无人机预计设计航时与航程,动力效率较低。

此模块需要考虑到电机KV值与桨叶尺寸的配比关系,最终选用郎宇2814-1400KV无刷电动机,配合好赢60 A无刷电调。

2.4 图传与地面站模块的选用

因为数字图传设备的稳定性和传输质量要高于模拟图传设备,所以考虑用全高清1080p数字图传作为所设计无人机的图传设备。

选用图传设备不仅要考虑到传输速度和传输稳定性等,还要考虑到有效传输距离(需要考虑受障碍物影响程度)、运行一定时间后图传设备主板的温度(温度过高会影响图传设备的传输工作),还有其发射信号的方向性,全向天线信号360°都能均匀辐射,是图传发射天线的最优选择。

在信号接收天线选择方面,由于定向天线和全向天线两者增益区别不大,且定向天线由于其信号指向尖锐,不易受信号指向外其他信号的干扰,接受特定信号效果对比全向天线好很多,因此考虑选用定向天线作为接收天线。

3 系统各模块的具体设计与调试

3.1 无人机主体设计及调试

本文所设计的无人机核心模块可分为飞控模块、动力与能源模块、图传模块3大类,无人机主体接线图和实物图分别如图3和4所示。

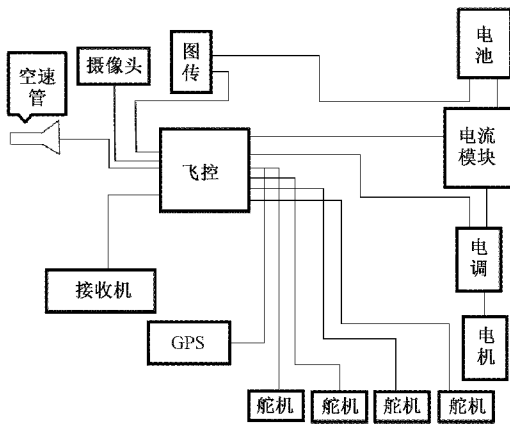


图 3 无人机主体接线图

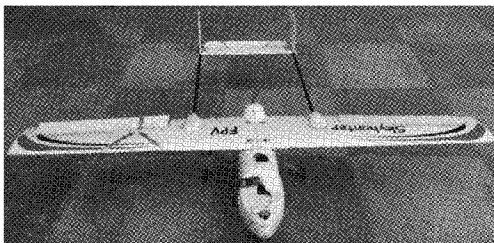


图 4 无人机主体实物图

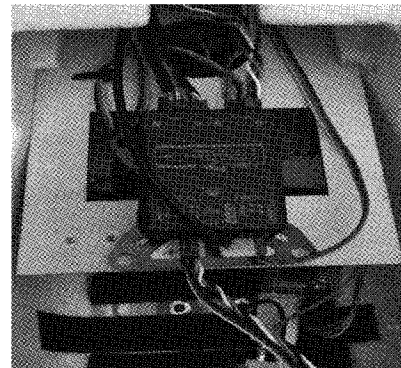


图 6 飞控模块飞控部分实物图



图 7 飞控模块 GPS 部分实物图

3.2 飞控模块设计及调试

飞控模块的核心部件是全新升级的 Arkbird Autopilot2.0 飞控,飞控模块连线图如图 5 所示,飞控模块飞控部分和 GPS 部分实物图分别如图 6 和 7 所示。

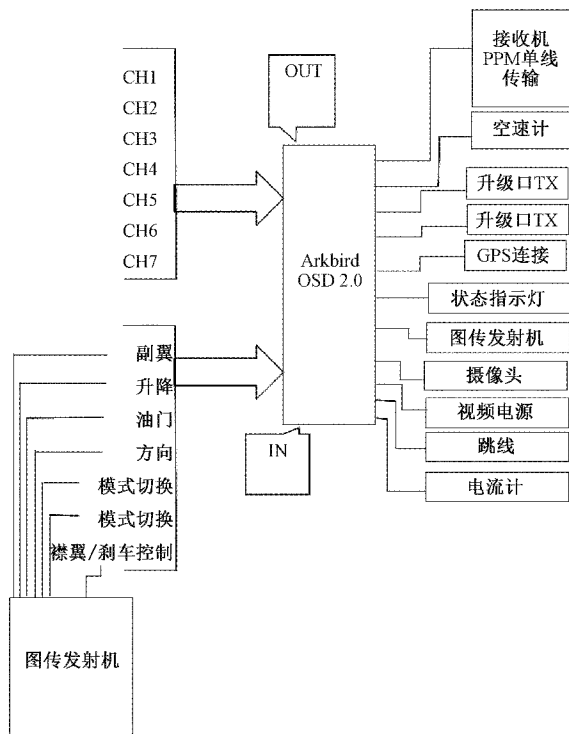


图 5 飞控模块连线图

本设计之所以选择 Arkbird Autopilot2.0 飞控,不仅考虑到其具有前面所提到的 8 大基本功能,更是看中了其具备的诸多特有的拓展功能,比如辅助手抛、垂直起降模式、智能襟翼控制、飞翼蝴蝶控制、数据记录、3D 陀螺模式、云台增稳、半平衡模式等。

3.3 动力与能源模块设计及调试

动力模块主要靠电流源供电,通过电子调速器带动电机旋转,电机转动提供动力,从而带动螺旋桨的旋转,提供给无人机整体动力以完成上升、巡航和下降等一系列工作。动力模块连线图如图 8 所示,动力模块电机和电调、电机和螺旋桨实物图分别如图 9、10 所示。

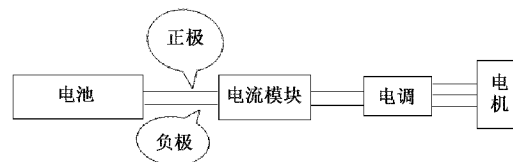


图 8 动力模块连线图

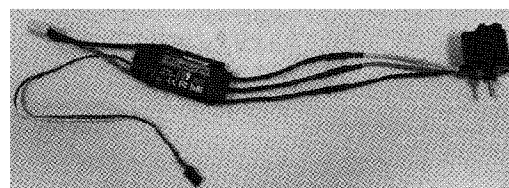


图 9 动力模块电机和电调实物图

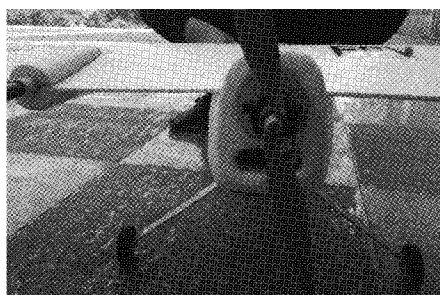


图 10 动力模块电机和螺旋桨实物图

本设计所选择的动力模块是在考虑电机 KV 值和桨叶尺寸的配比问题后的结果,详细数据如表 1 和 2 所示。

表 1 螺旋桨为 APC(美国电力转换)12x6 的性能表

尺寸/ inch	电压/ V	电流/ A	推力/ gf	功率/ W	运行效率/ (g · W ⁻¹)
	5.5		500	61.05	8.190 008 190
	9.4		750	104.34	7.188 039 103
	13.6		1 000	150.96	6.624 271 330
	18.2		1 250	202.02	6.187 506 188
APC12x6	14.8	24.1	1 500	267.51	5.607 267 018
	29.7		1 750	329.67	5.308 338 642
	37.0		2 000	410.70	4.869 734 599
	44.4		2 250	492.84	4.565 376 187
	48.0		2 400	532.80	4.504 504 505

表 2 桨叶规格为 X2820 KV1100 的详细信息表

X2820 KV1100	
定子外径/mm	28
定子厚度/mm	20
定子槽数	12
转子极数	14
电机 KV 值	1 100
空载电流/A	1.3
电机电阻/mΩ	19
最大连续电流	60 A/15 S
最大连续功率/W	880
重量(含长线)/g	138
转子直径/mm	35
出轴直径/mm	5
电机长度/mm	42
电机含轴总长度/mm	61
最大电池节数	3~5 S
建议使用电调	60 A
	APC11x5.5
	APC12x6
推荐螺旋桨	APC11x7
使用规格	APC9060
	APC1050
	APC11x8

电机与桨叶的选择关键点在于电机 KV 值与桨叶尺寸之间的搭配关系。电机的(空载)转速 = 电机 KV 值 × 电压,例如参数为 KV1000 的电机工作电压为 10 V 时其(空载)转速就是:1 000 × 10 V = 10 000 r/min。

其次要考虑到电池的放电能力,最大持续电流是:容量 × 放电 C 数(C 表示充放电能力倍率,1C 表示 1 h 电池完全放电时电流强度),例如电池参数为 1 500 mAh、10 C,则最大持续电流就是:1.5 × 10 C = 15 A。

综合考虑下,本设计最后选用了郎宇 2820-1400KV 无刷电动机配合好赢 60 A 电调的方式,将飞行时间调节至正常水平并保证无人机有足够的机动动力余量进行紧急情况下的机动飞行。

3.4 图传与地面站模块设计及调试

图传与地面站模块的选用设计也是非常重要的一个环节,图传模块连线图如图 11 所示,图传模块摄像头部分和图像传输发射机部分实物图分别如图 12 和 13 所示。

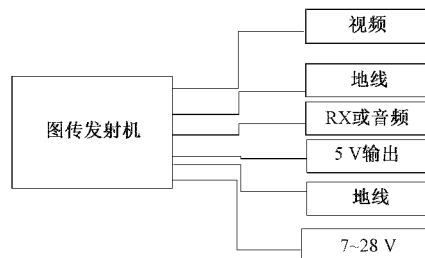


图 11 图传模块连线图

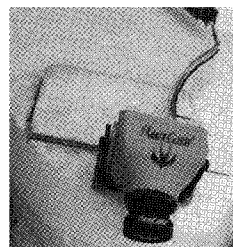


图 12 图传模块摄像头部分实物图



图 13 图传模块图像传输发射机部分实物图

1) 图传发射机模块的选用

图传模块的设计与调试中,对比了创新科 600 mW、鹰眼合金 600 mW、panda1W 和 aomway1W 4 种不同型号、不同功率的图传发射机。在同等条件(华耀 2.5 dBi 软天线向下安装)飞行过程中,创新科 600 mW 传输距离 1.2 km,

30 min 后主板温度 77 °C; 鹰眼合金 600 mW 图传传输距离 1.8 km, 30 min 后主板温度 67 °C; panda1W 图传传输距离 2.7 km, 30 min 后主板温度 73 °C; aomway1W 图传传输距离 3.4 km, 30 min 后主板温度 55 °C。经对比试验, 最终选定 aomway1W 图传作为飞行平台图传发射机。

2) 图传发射端天线的选用

图传天线的选用中, 对比了 foxeer 2.5 dBi 短天线(棒棒糖天线)、华耀 2.5 dBi 软全向天线(尾巴天线)、枫叶 5 dBi 全向天线(棒子天线)和 aomway 9 dBi 全向天线。在同等条件(aomway1W 图传, 天线朝下安装, 接收使用鹰眼锐视配合 fatshark 圆极化天线)飞行过程中, foxeer 2.5 dBi 短天线(棒棒糖天线)图传传输距离 2.8 km, 华耀 2.5 dBi 软全向天线(尾巴天线)图传传输距离 3.4 km, 枫叶 5 dBi 全向天线(棒子天线)图传传输距离 5.7 km, aomway 9 dBi 全向天线图传传输距离 6.9 km。经对比试验, 最终选定 aomway 9 dBi 全向天线作为图传发射天线。

3) 图传接收天线的选用

在图传接收天线的选用中, 对比了 fatshark 圆极化天线、黑羊圆极化天线、枫叶圆极化天线、枫叶 15 dBi 定向天线(小平板)、枫叶 17 dBi 定向天线(中平板)和枫叶 20 dBi 定向天线(大平板)。在同等条件(aomway1W 图传, aomway 9 dBi 全向天线, 朝下安装)飞行过程中, fatshark 圆极化天线图传距离 6.9 km, 黑羊圆极化天线图传距离 5.3 km, 枫叶圆极化天线 5.6 km, 枫叶 15 dBi 定向天线(小平板)16.8 km, 枫叶 17 dBi 定向天线(中平板)26.3 km, 枫叶 20 dBi 定向天线(大平板)33.2 km。经对比试验, 考虑到结合图传发射端天线的选用及性价比, 最终选定 fatshark 圆极化天线作为图传接收天线。

3.5 拓展模块双电源供电的设计构想

由于无人机携带电源器件较小, 带电量较少, 平台仍有飞行时长和航程等可以优化的地方, 所以在此提出双电源供电的设计构想, 可以选择动力, 使用锂聚合物电池为起飞动力电源, 以锂离子电池作为平飞巡航电源。老型飞机使用锂聚合物作为电源, 放电电流过大, 在恶劣地形电池不能持续; 而锂离子电池寿命高、能量比高, 可以适应各种恶劣环境, 没有过冲、过放之忧, 但放电电流小, 不适合做机动电源^[16]。两种电源互补, 双电源供电。电调使用最新科技达到双向电调和动力回收, 配合本设计模块化无人机可以达到长航时、远距离, 搭载所需负载于各种场地进行工作。

4 无人机的选用及试飞

下面将介绍模块化低空长航时无人机的主体选用过程和配合搭载模块的大量试飞实验对比选出最佳无人机工作, 并对无人机试飞时遇到的问题提出合理的解决方案。

4.1 无人机的选用

模块选择完成只是第 1 步工作, 选用最优搭载平台的工作成为重中之重, 本文主要针对传统飞行平台的航电、机

身构型方面加以改进。选择在市场上流传较多的几种构型、特质大不相同的飞行平台作为主要实验平台, 经过相关研究及搭载模块大量试飞实验, 对比选出最佳搭载的无人机飞行平台。

1) 预实验无人机

预实验无人机选用三角翼布局的 KT 材料制成的简易无人机飞行平台, 如图 14 所示。使用其进行了飞控模块的简单测试与短距离飞行试验, 确认无人机各模块可以正常使用, 主要确认了飞控模块的可搭载性, 提高后续飞行器试飞的安全性。

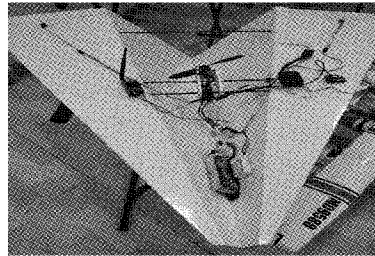


图 14 预实验的简易无人机平台

2) 初级实验无人机

初级实验无人机选用天捷力 Skysurfer(天空冲浪者)x8 型动力滑翔机, 如图 15 所示。此机型体积小, 便于起降, 使用其进行了飞控模块的短距离飞行试验与自动飞行实验, 确保飞控模块可以执行相应任务, 并对动力配置与图传配置进行了初期的探索。

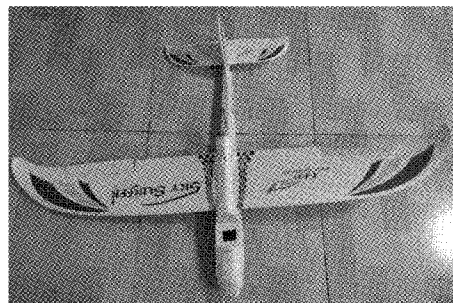


图 15 初级实验无人机 Skysurfer x8

3) 中级实验无人机

中级实验无人机选用捷特(Zate)z84 三角翼, 如图 16 所示。此型号无人机飞行速度快、易失速、动力较弱, 应用其进行了飞控模块专业测绘三角翼的移植融合实验、高速飞行试验、大震动飞行试验和大过载飞行试验, 并对动力装置及图传装置进行了部分定型。

4) 高级实验无人机

高级实验无人机选用天捷力 Skywalker(天行者)1880 上单翼动力滑翔机, 如图 17 所示。此型号无人机为航测级无人机, 翼展大, 飞行速度适中, 具有较大的载荷舱, 机身模块化设计, 可手抛起飞, 对飞行场地要求小。应用其进行了远距离飞行试验、强干扰飞行试验、航点飞行实验、恶劣



图 16 中级实验无人机捷特三角翼 z84

天气飞行试验和全自动飞行试验,并确定了动力配置及图传配置。

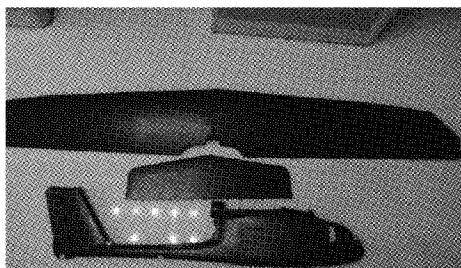


图 17 高级实验无人机 Skywalker1880

5)最终选用的无人机

本设计最终确定无人机选用 Sonicmodell Skyhunter (大猎鹰)1800 双垂尾腰推测绘平台,如图 18 所示。此型号无人机使用腰推布局,提高了飞行稳定性,不易失控,有良好的低速性能,机身模块化设计。在对其进行了一系列的加固与适应性改装后,此无人机可以达到预期目标要求。几款无人机的具体测试数据如表 3 所示。本设计选用无人机天空猎手 1800 飞行实时数据记录图如图 19 所示。

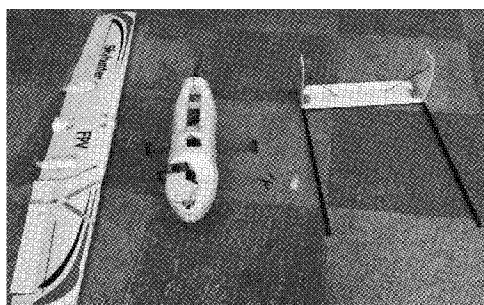


图 18 最终选用的无人机 Skyhunter 1800

由图 19 可以得到挂载飞行电流为 19.3 A,电池型号为 4S-2P-15000 ma/h,结合表 1 的性能表得到功率约为 214.23 W,根据挂载数据结合功能关系式 $W=P \times T$,可计算出理论挂载飞行时间。

首先由电池型号可得:

$W=2 \times 15\,000\text{ ma/h} \times 3\,600\text{ S} \times (4 \times 4.2\text{ V})=1\,814\,400\text{ J}$,所以, $T=W/P=1\,814\,400\text{ J} / (214.23\text{ W} \times 3\,600\text{ S}) \approx 2.35\text{ h}$,即经计算可得理论挂载飞行时间为 141 min。

由图 19 可以得到挂载飞行平均速度为 60 km/h,且理

表 3 几款无人机的实时测试数据表

无人机型号	载荷舱 体积/L	载荷飞行 时间/min
大疆筋斗云 s1000 多旋翼无人机	3.0	20
大疆悟 2 无人机	2.0	18
大疆经纬 m600pro 无人机	2.2	35
零度高一 (high one) 无人机	2.5	27
天捷力天眼固定翼无人机	2.5	68
天捷力鹰爪固定翼无人机	2.0	70
云雀固定翼无人机	2.2	50
本文选用无人机		
大猎鹰 1800	3.0	110



图 19 飞行实时数据记录图

论挂载时间已经计算得出为 141 min,根据 $S=V \times T$,可以计算出理想状态情况下的最大航程为: $S=60 \times (141\text{ min}/60)=141\text{ km}$,即经计算可得理论最大航程为 141 km。

此时已知挂载飞行平均速度为 60 km/h,再结合公式 $S=V \times T$ 和表 1 得出实际最大航程为: $S=60 \times (110\text{ min}/60)=110\text{ km}$,即经计算可得实际测试最大航程为 110 km (计算公式中所用的飞行时间为实际测试挂载飞行时间,而不是理论挂载飞行时间)。本机试飞飞行时间为表 3 内人工记录 110 min,飞行距离为 108 km。在实际操作中,由于飞行器进行爬升、下降和转向等机动动作,挂载器材重量和当天天气原因造成实际飞行时间略少于理论飞行时间。

由表 3 数据对比其他无人机平台可得,本文设计的无人机综合能力较高,在进行长航时、远距离的高强度作业时,拍摄画面清晰,作业效果较佳。美中不足的是,如同在飞控模块的选用中说过的一样,由于无法直接显示航时和航程,此类数据只能由计算得到理论值和试飞中人工记录实际值。另外,由于本文设计的此款无人机旨在为不高普通的普通大众提供一款方便拆装维修且可以有效地进行航拍、测绘等工作的模块化长航时无人机,所以此款无人机操作难度不宜过高,操作方法不宜复杂。

4.2 无人机试飞过程

除了对各个模块组成部分进行的大量调试过程外,对组装好的无人机平台也进行了丰富的试飞过程,主要试飞过程如下:1)进行了限制功率情况下图像传输模块的地面拉距实验;2)将图像传输模块移植预实验飞机并进行测距实验;3)将实验飞行控制模块移植至初级实验无人机并进行了不同环境(不同温度、湿度、风力等其他自然环境)条件下不同模式的飞行实验;4)将图像传输模块移植至中级无人机进行与主无人机各部分的融合实验;5)前往内蒙古某试飞场进行超远距离飞行测试;6)前往吉林省松花湖试飞场进行极限高度飞行测试;7)前往西安白鹿仓飞行小镇进行极限航时飞行测试和极端天气下的飞行测试。

4.3 无人机试飞问题及解决方法

预实验无人机在装载智能飞行控制模块的状态下起飞困难,空速过慢,导致各操纵面无法提供足够扭力改变飞行姿态,随后切换导致成功迫降。在调看视频和计算动力配比后,确定问题是原配电机功率过小,于是更换为更大动力的电机并安装 APC 马刀桨,在提高动力的同时降低了噪声。

初级实验无人机由于飞控仓狭小,无法有效地安装所有自动规划控制设备。后期对初级无人机进行部分改装,选用功率较小、体积较小的图传发射机且进行外置,在减轻起飞重量的同时增强散热,减少对飞行器舱内空间的使用。

中级实验无人机为三角翼布局,机身较重,起飞难度大,失速点高,在经过一次着陆过程中失速导致擦尾的实践后,更改了飞控控制逻辑,加入飞行中最低速度控制的功能,解决了受控失速的情况。在硬件上更换为更大的动力套装,解决了起飞困难的问题。

高级实验无人机在进行远距离飞行试验时,由于环境干扰大,空域限制多,无法有效测试出图传的极限传输距离与飞行器的最大飞行距离。在后期的测试中,将其携带至专用试飞场,成功进行极限飞行测试并得到了图传模块的相应数据。

本文设计的无人机为非常规翼型设置,机身较重,降落接地时易出现弹跳的问题。更改起落架的位置,并将前起落架换成带减震的跪式起落架,成功解决了飞机降落困难的问题,提高了无人机的可控性与安全性。

5 结 论

本文通过选择有较好降阻、减重、增大强度的机身和主翼,计算出等功率情况下上升、起飞、巡航段最优配比的电机和螺旋桨,优先选择动力与安全性较高的金属舵机作为伺服器,慎重筛选电子调速器、起落架、飞控、图传发射机、地面接收机等部件,进行大量的重复实验以选型,并进行各种基础功能的测试,集成设计出一款较优化的模块化低空长航时无人机平台。

该无人机飞行平台具备长航时和飞行距离远的特点,

可以在各种场地手抛起飞、降落,支持额外配件进行弹射、滑跑、垂直起降,可以滑降、伞降。起飞和降落条件相对要求低,对场地的适应性好,实用性强,功用全面,在应急抗震救灾、国土资源调查监测、数字城市和重大工程建设等方面具有广阔应用前景。

随着玻璃纤维和碳纤维等新型复合材料更加强大的功能逐渐进入大家的视线,本文所设计的无人机在未来技术成熟时可以尝试采用短玻璃纤维增强聚酰胺 6 制成的螺旋桨替代目前的桨叶。由于其平衡的材料性质,制成的器件更轻,刚性和强度也同传统复合材料相比大大提高。这些高性能材料还可以用于制作无人机的机身和起落架结构,具有良好的减轻、减振和降噪效果。相对于金属材料对无线电信号的干扰方面,该材料可以对信号干扰起到极大的遏制作用,大大提高平台整体的抗冲击性。另外,在未来技术成熟时可以采用双电源供电的设计构想,选择锂聚合物电池为起飞动力电源,使用锂离子电池作为平飞巡航电源,两种电源互补供电,以达到尽可能最大航时、最远距离,搭载所需负载于各种场地进行工作。

参考文献

- [1] KWAK D J, MOON S, KIM S, et al. Optimization of decentralized task assignment for heterogeneous UAVs[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(11): 251-256.
- [2] NIETHAMMER U, JAMES M R, ROTHMUND S, et al. UAV-based remote sensing of the super-sauze landslide: Evaluation and results [J]. Engineering Geology, 2012, 128: 2-11.
- [3] 侯天浩, 行鸿彦, 刘洋. 多旋翼无人机在气象探测中的现状与展望[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 7-15.
- [4] 唐猛. 基于多旋翼无人机飞行平台的侧向喷涂构造: 201810181313.X[P]. 2019-11-19.
- [5] 赵航, 王立峰. 基于 Pixhawk 的多旋翼无人机避障飞行系统研发[J]. 动力系统与控制, 2017, 6(3): 98-108.
- [6] 卢海峰, 吕皓, 李雯晴, 等. 基于移动平台的导游管理系统的设计与实现[J]. 计算机科学与应用, 2018, 8(5): 774-779.
- [7] 薄文娟. 国内外无人机系统的研究现状[J]. 通讯世界, 2016(24): 298.
- [8] 闫文娟, 王水璋. 无人机倾斜摄影航测技术与 BIM 结合在智慧工地系统中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 59-65.
- [9] 陈一洲, 林麒光, 夏京, 等. 基于无人机的城市空气质量移动式监测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 1-6.
- [10] 曲欣宇, 赵德群, 武历祺, 等. 基于 Android 的无人机海事巡检系统的设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(3): 152-157.

- [11] 张宏宏,甘旭升,李双峰,等. 复杂低空环境下考虑区域风险评估的无人机航路规划[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 257-266.
- [12] 苗建国,王剑宇,张恒,等. 无人机故障诊断技术研究进展概述[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 56-69.
- [13] 罗霄,薛亚洲,张乐. 一种无人机飞控计算机硬件平台的设计实现[J]. 电子测量技术, 2021, 44(1): 50-54.
- [14] 魏治强,王新华,刘正清,等. 鸭式布局无人机直接升力控制系统设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(1): 69-73.
- [15] ANG K Z Y, CUI J Q, PANG T, et al. Design and implementation of a thrust-vectorred unmanned tail-sitter with reconfigurable wings [J]. Unmanned Systems, 2015, 3(2): 143-162.
- [16] 张旭,张一鸣,王亮,等. 无人机电池温控系统设计[J]. 电源技术, 2015, 39(5): 965-967.

作者简介

华厚强,工学博士,讲师,主要研究方向为航空电子技术。
E-mail:huahouqiang@163.com