

一种无人多旋翼喷雾飞行器的设计

刘浩蓬 龙长江 胡 奔 王坤殿 潘海兵

华中农业大学工学院, 武汉 430070

摘要 鉴于南方田块小、分布散、不适合使用大型机械等特点,根据植保飞行作业的负载要求,设计制作了一种用于农田喷雾作业、负载 10 kg 的多旋翼飞行器。飞行器机架采用全碳纤维结构,连接部分采用硬化铝材。通过农田试验对设计方案的可行性进行验证,结果表明,飞行器整体结构稳定,性能可靠,在满载的条件下可持续作业 15 min 左右,作业效率高而劳动强度低。

关键词 植保装备; 喷雾作业; 多旋翼飞行器; 无人飞行器; 电动飞行器; 农业航空装备

中图分类号 Q 66 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2016)03-0140-05

随着我国农业的迅速发展,农业生产中对植保作业装备的要求越来越高。由于人工成本逐年增加,农业航空装备以其节省人力、技术先进和作业效率高等优势逐渐进入农业植保行列。国外发达国家在农业生产集约化、综合化的趋势下,大力发展农业航空装备,使用的农业飞机成为农业机械的一个重要组成部分。农业飞机在生产过程中飞行组织迅速、作业效率高、单位面积作业成本低。目前,我国农业植保喷雾作业主要使用传统的喷雾设备作业,依靠人力完成,不仅作业效率低,而且在作业过程中还容易引发中毒事件^[1]。部分植保作业由有人飞机执行,但作业计划需要层层上报,无法快速调度,可能贻误病虫害控制的最佳时机。采用无人机(UAV)的喷雾装置起降大多不需要专用的机场,飞行稳定性高,操控性能好^[2-3],作业灵活,为无人植保飞行器的广泛应用提供了可行性。随着农业航空的飞速发展,农用植保无人机越来越受到农民的青睐^[4]。目前,用于农业植保的无人机主要有油动/电动直升机、油动/电动固定翼飞行器、电动多旋翼飞行器等。其中,油动或电动直升机续航短、载质量小、操作难度较大;油动或电动固定翼作业精度低,需要专用的起降跑道,操作难度大;而电动多旋翼飞行器具有负载大、飞行稳定、操作简单和控制灵活等优点^[5]。为改善农民现有植保装备,针对我国南方水田农业作业环境复杂、各户田块面积小、田块分布

散乱等现状,笔者设计制作一种成本较低、能够实现小田块高效作业的电动多旋翼喷雾飞行器,为其他航空农业植保飞行器的设计提供一定的借鉴作用。

1 多旋翼喷雾飞行器的设计

1.1 总体设计方案

根据农田作业要求,多旋翼喷雾飞行器需要具备较高的负载能力,能在贴近地面的环境中持续作业,因此,飞行器的功率要求较高,在方案设计时拟采用 8 个旋翼。该多旋翼喷雾飞行器主要由机架、飞行控制(以下简称飞控)系统、无线通信系统、喷雾系统等 4 个部分构成。系统机械部分由 8 个无刷直流电机、机架臂、中心连接板、机体支持脚架和其他连接部件等组成。飞控系统主要由无刷直流电机电子调速装置以及大疆公司生产的悟空多轴飞行控制器和 GPS 导航装置等组成。无线通信系统采用手持式的遥控 2.4 G 无线通信设备。喷雾系统主要包含喷雾泵、直流电机调速装置、储药箱和喷头等。使用具有大电流、大容量的锂电池作为系统的供电电源。多旋翼喷雾飞行器的总体设计框图如图 1 所示。

由图 1 可知,操作者使用手持式无线遥控设备将飞行运动和喷雾量控制信号通过无线装置发送到飞控系统和喷雾系统,飞控系统根据接收到的信号计算出每个旋翼的转速控制量,并将控制量发送给每个旋翼电机,电子调速器将电机控制在相应的转

收稿日期: 2015-06-01
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2014JC001); 华中农业大学优博优硕项目(0900205177)
刘浩蓬, 硕士研究生, 研究方向: 无人机应用. E-mail: 617502523@qq.com
通信作者: 龙长江, 副教授, 研究方向: 无损检测、自动控制. E-mail: lcjflow@163.com

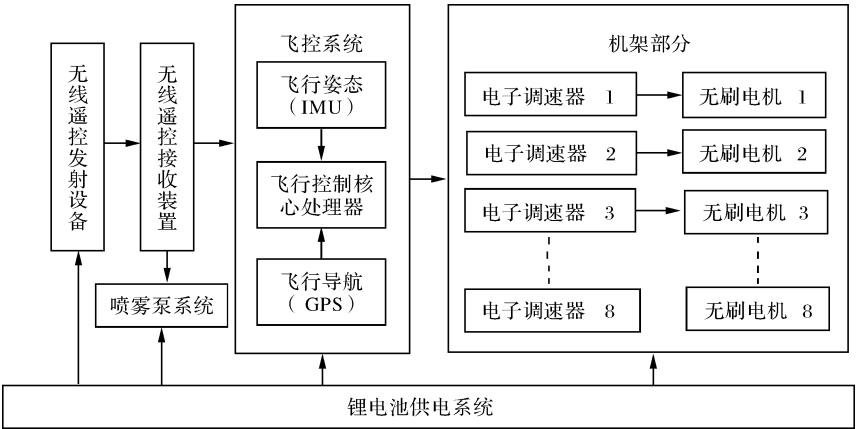


图 1 多旋翼飞行器的总体设计框图

Fig.1 The overall design diagram of rotor aircraft

速上,喷雾系统根据喷雾量控制信号通过直流电机调速电路调节泵的转速来改变喷雾量的大小。操作者在控制飞行器灵活飞行的同时,还可以根据病虫害的严重程度调节喷雾量,实现远程操控精量喷雾作业。

1.2 机械结构总体布局

根据设计要求,为了保证飞行的稳定,以及大载荷下机械机构的可靠性,设计的多旋翼飞行器机械结构示意图如图 2 所示。

器的信号调节泵的转速,控制喷雾量;飞行器上所有设备均由动力电池提供能量。

飞行器机架的机构相对较复杂,飞行器机架的 8 个悬臂的一端固定电机,另一端与机架的中心板固定在一起,为了保证悬臂受力均匀,将 2 个悬臂通过横杆固联在一起,起落架安装在横杆上,横杆安装位置靠近悬臂中间,能够很好地减小悬臂对中心板的扭力,使机架机构牢固紧凑,受力均匀。喷雾系统的主体安装尽量靠近飞行器的物理中心,这样可以更好地保证系统的重心集中在机体中心,以简化飞行器的控制系统设计。根据作业要求将喷雾幅宽设计为 2.5 m,根据喷雾的幅宽布置 3 个喷雾头,保证作业幅宽内喷雾的全覆盖,同时将喷雾泵的安装位置远离飞控系统,避免大功率电机对飞控系统产生电磁场干扰。

1.3 关键部件的设计与选型

1)机架的设计。飞行器的机身各部分大多采用碳纤维材料^[6]。对于某些连接件和电机安装座等采用经过特殊的硬化处理的 7075 铝合金材料^[7]。

2)无刷电机、无刷电调的选型。多旋翼飞行器的机架以及喷雾装置等机械装置总质量达到 3.6 kg,电子设备和动力电池的总质量达到 5.0 kg,总体质量(空载)控制在 10.0 kg 以下;设计额定载荷为 10.0 kg,因此,飞行器在满负荷悬停状态下提供的升力初步设计为 196 N,每个旋翼提供的最小升力相应为 24.5 N。飞行器在姿态改变时,电机给飞行器提供的总体垂直拉力不变但单个旋翼产生的升力会发生改变。设飞行器飞行的倾角为 θ ,其最大值为 30° ,飞行器的单个旋翼在最大倾角下的受力分析如图 3 所示:

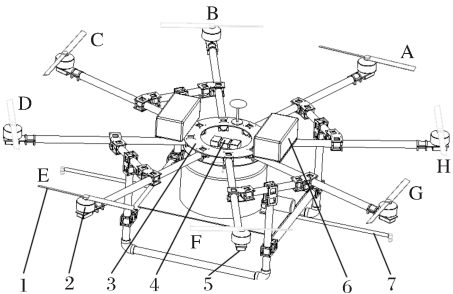


图 2 多旋翼飞行器机械结构示意图

Fig.2 Mechanical structure diagram of multiple rotor aircraft

从图 2 可知,多旋翼飞行器由螺旋桨、无刷直流电机(以下简称电机)、多旋翼机架、飞控、无刷电机调速器(以下简称电调)、动力电池、喷雾系统组成。系统包含 8 个旋翼,每个旋翼包含 1 个机臂、1 个无刷直流电机和电调,电机与电调相连,将电调布置在电机的下方,电机转动时螺旋桨可以为电调散热;电调的控制信号线与飞控系统相连,飞控系统同时与接收机和组合导航设备相连,在接收接收机信号同时,采集飞行器自身的姿态信息;喷雾系统根据接收

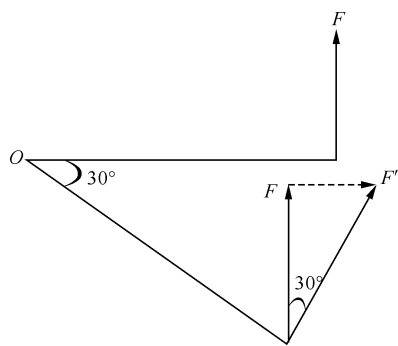


图 3 单个旋翼的受力分析

Fig.3 Stress analysis for a single rotor

由图 3 的受力分析可知,飞行器产生固定升力需要的拉力随倾角的增大而增大。在额定升力为 F 时,设每个旋翼需要提供的拉力为 F' ,则:

$$F' = \frac{F}{\cos\theta}$$

(1)

表 1 3 种电机的特性参数

Table 1 The characteristics of three kinds of motor parameters

型号 Modle	电压/V Voltage	试验桨/(mm×mm) Prop	电流/A Current	拉力/N Thrust	转速/(r/min) RPM	功率/W Power	效率/(g/W) Efficiency	单价/¥ Price
飓风 U7 KV400	22.2	18×5	31.6	40.67	5 980	663.6	6.25	988
恒力 6025 KV300	22.2	18×5	30.2	35.77	5 325	576	5.51	370
T-Motor U- POWERKV420	22.2	18×5	37.8	40.87	5 700	778	5.36	949

机的飞行姿态。

由图 2 所示,定义旋翼(A、B)对角线方向为飞行器运动的正方向,以此为界线可以将飞行器的 8 个旋翼分为旋翼组 1(B、C、D、E)和旋翼组 2(F、G、H、A)2 组,旋翼组 1 的转速增加(或减少),同时旋翼组 2 的转速等量减少(或增加)时,飞行器在横滚方向发生偏移运动,将其称之为横滚运动,以旋翼(C、D)对角线方向为界线,可以将飞行器的 8 个旋翼分为旋翼组 3(D、E、F、G)和旋翼组 4(H、A、B、C)2 组,旋翼组 3 的转速增加(或减少),同时旋翼组 4 的转速等量减少(或增加)时,飞行器在俯仰方向发生偏移运动,将其称之为俯仰运动。由于飞行器相邻电机转向相反,通过螺旋桨旋转时产生的反扭力来实现飞行器的偏航运动,所以按照螺旋桨旋转方向将旋翼分为旋翼组 5(A、C、E、G)和旋翼组 6(B、D、F、H),同理将旋翼组 5 的转速增加(或减少),同时将旋翼组 6 的转速等量减少(或增加)时,飞行器在方向上发生偏航转动,将其称之为偏航运动。在同时增加(或减少)全部旋翼的转速时,飞行器整体升力发生改变,进而产生上下运动,实现飞行

则垂直升力 F 为 24.5 N 时,单个旋翼提供的拉力必须达到 28.32 N。根据这一动力要求对电机进行选型。根据设计需求选择了几款符合条件的主流电机,电机的主要特性参数如表 1 所示。从表 1 中可知,3 款电机的拉力值都超过设计需求,由于飞行器飞行过程中姿态会受到外界的干扰,因此,需要的实际拉力比理论计算值大,因此,拉力值设计必须保持一定裕量。基于经济性原则,选择性价比最高的恒力 6025 电机作为此飞行器的旋翼电机。电调根据设计规则,选择额定电流 1.5 倍以上的电调,因此,选用额定电流为 50 A 的好盈乐天(xRotor-50A)电调。

3)飞控系统原理与选型。飞控系统是多旋翼飞行器的核心部分,主要作用是根据姿态传感器检测的结果,对比目标值,发出相应的控制信号,修正飞

器的垂直运动。

大疆公司生产的悟空(WOOKONG-M)飞控系统稳定性好,故障率低,市场占有率最高,因此,将其作为飞行器的飞行控制系统。该控制系统飞行控制性能良好,悬停精度高(垂直方向:± 0.5 m,水平方向:± 2 m),抗风能力强(<8 m/s,39.42 m/s),垂直方向的运动速度上限为 6 m/s,可以完美地支持八旋翼飞行器载重飞行,同时此款飞控售价较低,能很大程度降低飞行器的成本。

4)其他硬件设计。根据设计要求,选择型号为 0142HB-12-15P 的高压造雾泵。该泵质量 0.79 kg,功率为 15 W,工作压力 8 MPa,流量最高可达 1 L/min。

5)飞行器机架的设计。为避免各螺旋桨产生的气流相互干扰,相邻螺旋桨之间需要保留适当的距离 d (取 d 为 40 mm)。飞行器采用恒力 6025 电机和直径 458 mm 碳纤维螺旋桨。设机架轴距(关于机架中心对称的 2 个电机中心轴之间的距离)为 L ,由于有 8 个轴,则:

$$L = \left(\frac{a}{2} + d \right) / \sin(22.5^\circ)$$

(2)

计算 L 并取整,该飞行器设计轴距为 1 250 mm。因飞行器在飞行过程中机臂产生变形会影响飞行器的稳定性,因此,在相邻机臂 B-C、D-E、F-G 以及 H-A 之间安装横杆,以约束机臂水平方向上的变形,提高飞行稳定性;另外还将起落架的 4 个安装杆安装在横杆上,将喷雾装置的重力均匀地分配到每个机臂上,进一步增加了机架的整体结构强度。

2 飞行器喷雾试验

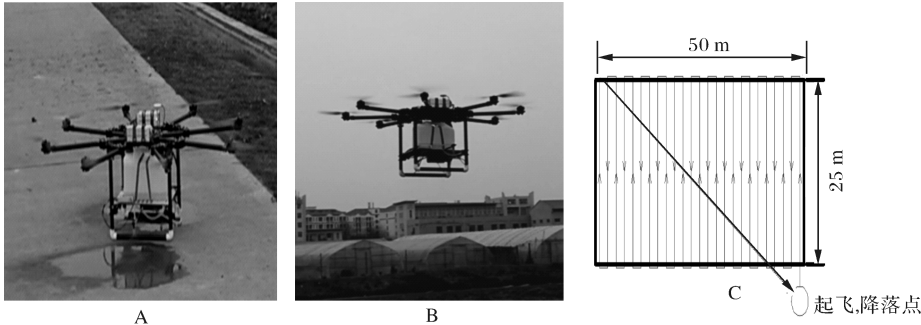
2.1 试验材料

飞行器进行田间喷雾试验地点为华中农业大学试验田,试验设备及工具为多旋翼喷雾飞行器、皮尺、手执式电子钩秤、水桶及秒表。

2.2 试验方法

使用皮尺量取 50 m×25 m 大小且较为空旷的

田块,并放置标记物,作为试验田块(为检测飞行器的控制稳定性,选取阵风较大的天气进行试验)。试验前,对飞行器的 3 组电池进行充电,并记录充电时间。充电完成后,用手执式钩秤和水桶称取 10 kg 水注入多旋翼喷雾飞行器的水箱。将飞行器平稳地放置在试验田田间道路上(该飞行器具有垂直起降功能,因此,仅需 5 m² 大小的平地即可以实现起降),接通电源等待系统初始化完毕,飞至 5 m 高处悬停,同时开启水泵进行喷雾作业,开始计时,试验过程如图 4 所示。操控飞行器按照预定轨迹飞行,当飞行器完成整个田块作业时记录 1 次时间;在水液完全耗尽时记录 1 次时间;在飞行器因动力不足而自动下降时停止计时,作为飞行器飞行总时间。飞行航线如图 4C 所示,飞行器从矩形田块的一角起飞,沿航线飞行,作业幅宽约为 2.5 m。



A:地面喷雾试验 Spray test on the ground; B:空中喷雾试验 Spray test in the air; C:飞行航线示意图 Flight path diagram.

图 4 喷雾试验

Fig.4 Spray test on the ground and in the air

表 2 试验结果
Table 2 Results of test

主要参数 Key parameters	试验序号 Test number			均值 Average value
	1	2	3	
充电时间/min Charge time	93	94	90	92.3
总续航时间/min Total endurance	15.2	15.7	14.9	15.3
完成规定田块作业时间/min Standardized work time	149	157	146	150.7
喷雾速度/(m ² /s) Spray velocity	9.14	8.33	8.89	8.78
喷雾总时间/min Total spray velocity	9.3	9.4	9.7	9.5
载质量/kg Loading capacity	10.0	10.0	10.0	10.0
飞行器空载/kg Weight of vehicle	9.8	9.8	9.8	9.8

2.3 试验结果

完成试验后,对所记录的试验数据进行统计分析,试验结果如表 2 所示。

由表 2 可知,该飞行器可载质量 10.0 kg 液体药物,总续航时间 15 min 左右,完成 1 次充电时间约为 1.5 h。飞行器完成 10.0 kg 液体药物喷雾作业的时间约为 9.5 min,喷雾速度较快,在精量喷雾的情况下,调整喷雾速度,续航时间 15 min 可保留一定余量。飞行器作业速度可达 8.78 m²/s,效率较高。

3 讨论

结构设计时必须保证机架的强度和稳定性,不会因负载产生明显形变以致影响飞行特性和操控性;为减少机体空载质量尽可能采用轻质材料;同时考虑到农药等物质可能具有一定的腐蚀性,因此,机架部分采用了强度高、耐腐蚀性好并且轻质的碳纤维材料。

多旋翼飞行器在飞行运动可归结为 4 种类型,即垂直运动、俯仰运动、横滚运动和偏航运动^[8]。由于多旋翼飞行器是一种四输入、六自由度的不稳定

的强耦合系统^[8],所有运动通过协调飞行器上各旋翼的转速来实现,因此,必须选择一种可承受载荷大、稳定性高的飞行控制系统^[9]。大疆(DJI)公司、零度智控制公司(ZERO TECH)、极飞电子科技有限公司(XAIRCRAFT)等公司生产的多种飞控都能较好地满足性能需求。考虑到市场占有率、经济性等因素,本设计采用大疆公司生产的悟空(WOOKONG-M)飞控系统。

在喷雾系统设计时为简化电路,将电动泵与无刷电机共用 1 个电源,则电动泵额定电压应为 22.2 V 左右。因此,选择常见的供电电压在 24 V 以下的电动泵。按照设计要求,飞行器在 20 min 内要完成 10 L 的喷雾作业,因此,喷雾流量理论值为 0.5 L/min,实际电动泵流量应大于 0.5 L/min,故选择了型号为 0142HB-12-15P 的高压造雾泵。

通过试验可知,该飞行器可载质量 10 kg 液体药物,总续航时间约 15 min,一次充电时间约为 1.5 h。操作飞行器作业速度可达 8.78 m²/s,人工作业速度约 0.32 m²/s,飞行器作业速度相对于人工作业有明显优势,同时很大程度上解放了劳动力,也降低了喷雾中毒事件的发生概率。与同类多旋翼飞行器相比,本飞行器设计精简了复杂的折叠机构,同时改变了药箱的固定结构,采用了高稳定性的飞行控制系统。不仅提高了飞行器的结构的稳定性,也使飞行器各部分受力更加均匀,也节约了成本,提高

了可维护性。虽然该飞行器载荷相较于大型喷雾拖拉机小,续航时间较短,但是由于电池可以快速更换,药液可以及时添加,因此也能进行大范围内的作业。由于空中作业不会与土壤发生直接的接触,因此避免造成土壤压实,不破坏土壤质量,有利于土地资源的可持续发展。同时飞行器使用电能作为动力源,减少了化石燃料的使用,符合低碳环保要求。综上所述,此多轴飞行器在农田作业中可大面积推广。

参 考 文 献

- [1] 唐强,史龙,雷志荣,等.AF811 植保无人直升机作业系统[J].农业技术与装备,2014(5):31-34.
- [2] 吴小伟,茹煜,周宏平.无人机喷洒技术的研究[J].农机化研究,2010,32(7):224-228.
- [3] 李继宇,张铁民,彭孝东,等.小型无人机在农田信息监测系统中的应用[J].农机化研究,2010,32(5):183-186.
- [4] 周志艳,臧英,罗锡文,等.中国农业航空植保产业技术创新发展战略[J].农业工程学报,2013,29(24):1-10.
- [5] 庞庆霈.四旋翼飞行器设计与稳定控制研究[D].合肥:中国科学技术大学,2011.
- [6] 李威,郭权锋.碳纤维复合材料在航天领域的应用[J].中国光学,2011,4(3):201-211.
- [7] 韩剑,戴起勋,赵玉涛,等.7075-T651 铝合金疲劳特性研究[J].航空材料学报,2010,30(4):92-96.
- [8] 刘乾,孙志锋.基于 ARM 的四旋翼无人飞行器控制系统[J].机电工程,2011,28(10):1237-1240.
- [9] 刘浩蓬,龙长江,万鹏,等.植保四轴飞行器的模糊 PID 控制[J].农业工程学报,2015,31(1):71-77.

Designing an unmanned multi-rotor spray aircraft

LIU Haopeng LONG Changjiang HU Ben WANG Kundian PAN Haibing

College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract An unmanned multi-rotor spray aircraft was designed to solve the problems existed in southern China including the complex operational environment of agriculture, scattered distribution of farmland, low efficiency of manual spraying operations. This aircraft has advantages of high efficiency, low labor intensity, good adaptability to operating environment. The vehicle frame adopts full carbon fiber structure, hardened aluminum connecting parts. The structure is stable and reliable. It can keep working 15 minutes under the condition of continuous operation with the load of 10 kg. It will provide a reference for spray, forestry, forest monitoring.

Keywords plant protection equipment; spray operation; multi rotor aircraft; unmanned vehicles; electric vehicle; agricultural aviation equipment

(责任编辑:陆文昌)