



北京航空航天大学
B E I H A N G U N I V E R S I T Y

独立模块化多旋翼无人机构想

2017 年 3 月 1 日

摘要：

当今，无人机正在迅速发展，已走进越来越多人的生活。无人机的编队飞行、模块化、多功能化，属于其若干发展方向。无人机模块化的组成不仅便于操作组合，还为多功能化的实现创造了无限可能。而且微小型无人机行动灵活的特点，使其具有可以执行许多任务的潜力。本项目构想将“模块化”与“多功能化”进行结合，应用于微小型多旋翼无人机上，并且使其具有编队飞行的潜力。而“独立模块化”的设计是指整体的部分——即部分“飞行器模块”具有一定的独立性，可以实现独立的飞行。本论文将基于以上设想进行分析论证，提出合理的独立模块化无人机设计构想，从设计创意与原理、设计理念、整体设计、应用前景方面展开分析、讨论。

关键词： 模块化，多旋翼，无人机

目录

| | |
|--------------------|----|
| 引言..... | 1 |
| 一、 设计原理..... | 1 |
| (一) 飞行器动力学原理 | 1 |
| (二) 模块拼接的实现 | 3 |
| 二、 设计理念..... | 4 |
| (一) 模块化设计 | 4 |
| (二) 独立化设计 | 4 |
| (三) 多功能化设计 | 4 |
| 三、 可行性分析..... | 4 |
| (一) 材料选择 | 4 |
| (二) 外形结构 | 5 |
| 1、 概述 | 5 |
| 2、 模块化设计 | 5 |
| 3、 布局设计 | 8 |
| (三) 功能实现 | 10 |
| 1、 概述 | 10 |
| 2、 拍摄监控功能 | 10 |
| 3、 数据收集检测功能 | 11 |
| 4、 运输喷洒功能 | 12 |
| (四) 控制实现（难点） | 13 |
| 四、 应用前景..... | 14 |
| (一) 应用场景 | 14 |
| (二) 市场需求 | 14 |
| 结论..... | 15 |
| 参考文献..... | 16 |

图目录

| | | |
|------|--|----|
| 图 1 | 扭转力 f_1 , f_2 , f_3 垂直作用于各轴..... | 2 |
| 图 2 | 升力 F_1 , F_2 , F_3 作用于各轴..... | 2 |
| 图 3 | 六旋翼飞行器机体坐标系和姿态角示意图..... | 3 |
| 图 4 | 几种磁吸式连接器..... | 3 |
| 图 5 | EPP (左) 与 PP (右) | 5 |
| 图 6 | 各模块之间的关系..... | 5 |
| 图 7 | 旋翼模块渲染图..... | 6 |
| 图 8 | 控制模块渲染图..... | 7 |
| 图 9 | 组合模块渲染图..... | 7 |
| 图 10 | 核心模块 (简易) 渲染图..... | 8 |
| 图 11 | 整机-多旋翼布局 (简易) 四视图 | 9 |
| 图 12 | 整机-多旋翼布局 (简易) 渲染图 | 9 |
| 图 13 | 气动悬浮原理示意图..... | 10 |
| 图 14 | 数字摄像头..... | 11 |
| 图 15 | 航拍云台..... | 11 |
| 图 16 | PM2.5 检测仪..... | 12 |
| 图 17 | 气象传感器..... | 12 |
| 图 18 | 携农药喷洒式起落架示意图..... | 13 |
| 图 19 | 模拟 PID 控制原理图 | 13 |
| 图 20 | 飞行控制系统硬件结构示意图 (简易) | 14 |
| 图 21 | Kesterl 飞行器控制板..... | 14 |
| 图 22 | 民用无人机市场需求现状与预测..... | 15 |
| 图 23 | 2013-2015 年全球民用无人机细分市场销量 | 15 |

引言

当今，无人机已走进越来越多人的生活。随着大疆公司精灵系列无人机在 2013 年 1 月推出，多旋翼无人飞行器走入人们的视野。

此外，多旋翼无人机编队飞行表演已经实现，具有很大的应用前景，如在 2017 春晚节目《满城烟花》上，50 余架应用了多套定位系统的无人机，在春晚上带来了一场绝美无比的视觉盛宴——无人机舞蹈。

当前模块化无人机也有许多优秀的设计先例，如中国深圳创客公司 Makeblock 设计的 AirBlock、国外的 Snap 无人机等。

本项目初步构想设计一架模块化无人机，其每个模块又可以独立飞行，这些模块还具有编队飞行的潜力，模块之间可以自由组合，从而实现了不同功能的转化。

本项目采用独立的模块化设计，具有以下特点：

1. 模块化飞行器具有拼拆灵活、携带便捷的特点。
2. 模块不同的拼接方式以及更换模块，可以实现飞行器具有多种用途。
3. 通过改变模块，甚至可以使飞行器能够变为气动小车和气动快艇，大大拓宽了其用途。
4. 灵活的独立模块具有编队飞行的潜力，有许多应用前景。
5. 独立模块化飞行器操作灵活，但相较于传统的多旋翼飞行器，实现对其的控制将更为复杂。

一、 设计原理

（一） 飞行器动力学原理

本项目主要采用三旋翼和六旋翼的设计布局。

在三旋翼飞行器飞行时，电机会产生两种力：

一种是三个电机产生的扭转力 f_1 , f_2 , f_3 ，扭转力在 X-Y 平面内可近似认为分别垂直作用于 l_1 , l_2 , l_3 上，如图 1 所示；另一种力是电机分别产生的升力 F_1 , F_2 , F_3 ，它们的方向向上且垂直于 X-Y 平面，如图 2 所示。^[1]

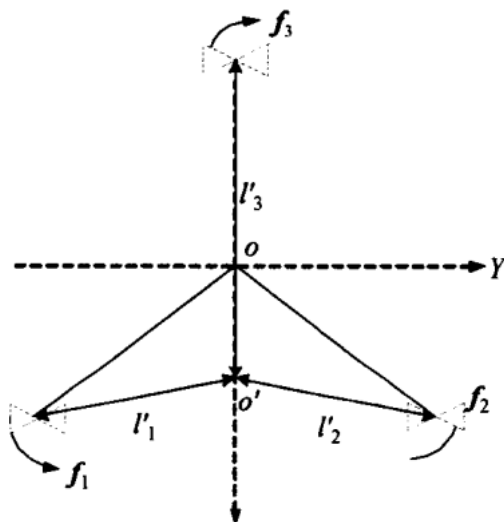
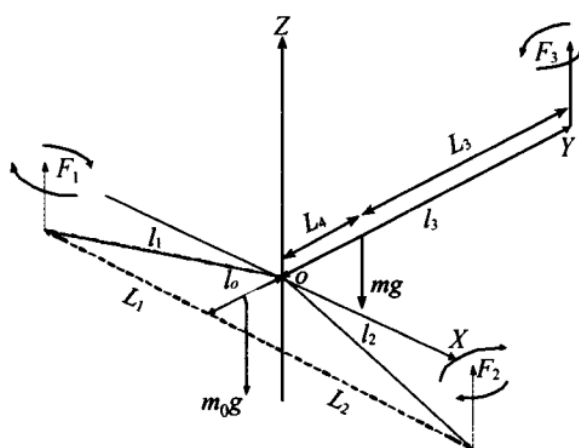


图 1 扭转力 f_1, f_2, f_3 垂直作用于各轴



附注 1: 其中 m_0 为配重, l_0 为配重器重心到支点 o 的位置

图2 升力 F_1 , F_2 , F_3 作用于各轴

通过分析整体物理力矩,在理论上可以使得力矩相互抵消,再对其各姿态等参数进行数学分析可以建立三旋翼飞行器的数学模型,得出飞行姿态控制系统的动力学方程,因此,在理论上可以实现三旋翼飞行器的飞行和对其的控制。

相似地,六旋翼飞行器也可以得出飞行姿态控制系统的动力学方程,根据辛冀等教授^[7]对六旋翼无人机飞行力学建模研究,六旋翼飞行器也可以实现飞行和控制。

六旋翼无人机布局中, 六个旋翼产生的拉力作为飞行器的操纵力。如图 3 所示, 其六个旋翼依次连接则为一个正六边形。

六个旋翼具有不同的旋转方向，改变旋翼的转速可以改变飞行器的姿态和位置。六旋翼无人机具有两个冗余的操纵量，即使遇到强外力干扰或部分旋翼受损，仍具有良好的稳定性和安全性，因此更适合在恶劣的环境下工作。^[7]

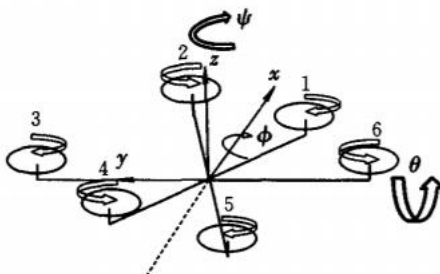


图3 六旋翼飞行器机体坐标系和姿态角示意图

（二） 模块拼接的实现

模块化飞行器设计中，模块之间的拼接是一大重点，常见的传统连接方式是螺钉连接，但这一连接方式使用在模块化飞行器上会造成很大不便。

本项目模块之间将采取磁吸式连接器的连接方式。一方面，便于拆拼，符合模块化飞行器便捷的设计要求；另一方面，采用磁力吸引可以防止飞行器在飞行时震动而导致组件的松动。



图4 几种磁吸式连接器

二、设计理念

（一） 模块化设计

本项目采取六边形模块布局，通过磁体和电子连接器实现模块之间的连接。模块将分为“基础模块”和“核心模块”两大类。这其中，“基础模块”包括“旋翼模块”和“控制模块”，若干“基础模块”拼装而成的结构称为“组合模块”。再将“组合模块”与不同“核心模块”拼装，从而实现不同的功能。

（二） 独立化设计

每一个组合模块可以独立飞行、独立控制，并且每个组合模块都是一个微型三旋翼飞行器，具有陀螺仪、飞行控制板、电池、传感器等组件。正是这一设计理念，使得一个完整的无人飞行器也可以拆分成若干更小的飞行器，为通过编程实现的编队飞行提供了良好平台。

（三） 多功能化设计

多功能化主要体现在执行任务的多样性和运动方式的多样性上。通过连接不同核心模块可以实现不同的功能转化以完成不同任务（如航拍、监控、高空测量、农药喷撒等等）。通过更换模块以及采用模块不同的组合方式，还可以实现海、陆、空不同的运动方式之间的转化。

三、可行性分析

（一） 材料选择

材料的选择上主要遵循满足结构强度和减轻结构重量两大原则，并考虑并权衡成本和环保因素：

将采用 EPP（发泡聚丙烯）作为外壳，PP（聚丙烯）作为骨架。

选择理由：

EPP（发泡聚丙烯）是一种环境友好型的塑料，无毒性，可以重复使用，可回收；具有着优秀的力学特性，具有较好弹性，比重较轻，可以起到减压抗震的效果；此外，它还具有绝缘、耐热等特点。

PP（聚丙烯）具有优良的力学性能，低密度，强度、刚度、硬度耐热性均较好，无毒。



图5 EPP（左）与 PP（右）

（二） 外形结构

1、 概述

每个组合模块是一个微型三旋翼飞行器，在飞行器的中央有陀螺仪、电池、传感器等组件（即控制模块），每个旋翼由一个小六边形框架包围（旋翼模块），组合模块可以自由独立飞行（需后期通过编程实现），且由一个大的六边形框架包围，以便于拼接组合。

核心模块则是本飞行器的灵魂所在，赋予了飞行器执行不同任务的能力。

3 个或 6 个组合模块可以与核心模块组合，为一架完整飞行器。

此外，通过变更拼接方式和核心模块，还可以构成气动小车布局 and 气动小船布局，拓宽了活动的范围，更具灵活性。

2、 模块化设计

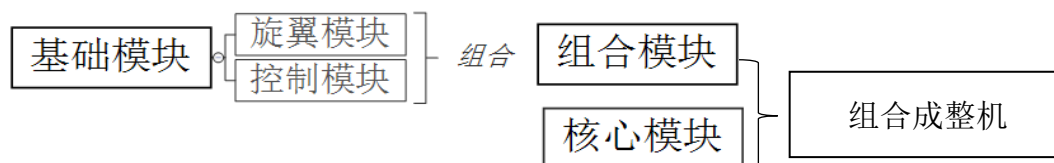


图6 各模块之间的关系

基础模块：包括旋翼模块和控制模块，是该模块化飞行器最基础的部件。旋翼模

块：一个旋翼单元，如图 7，由六边形框架包围，具有无芯电机、电子调速器、螺旋桨、连接器。

控制模块：外观如图 8，包括电池、六轴陀螺仪、飞行器控制板、气压表、LED

（用于指示）、接收机、各类传感器等。用于提供电力、分析飞行状态、信号传输、控制飞行。

组合模块：如图 9，三个旋翼模块与一个控制模块拼接，为组合模块。是本飞行器的最小飞行单位，可以独立飞行。

核心模块：如图 10，不仅是控制飞行器的“大脑”，即实现分析综合各个旋翼的飞行状态、控制飞行的功能；而且也是实现其不同功能的核心部件。

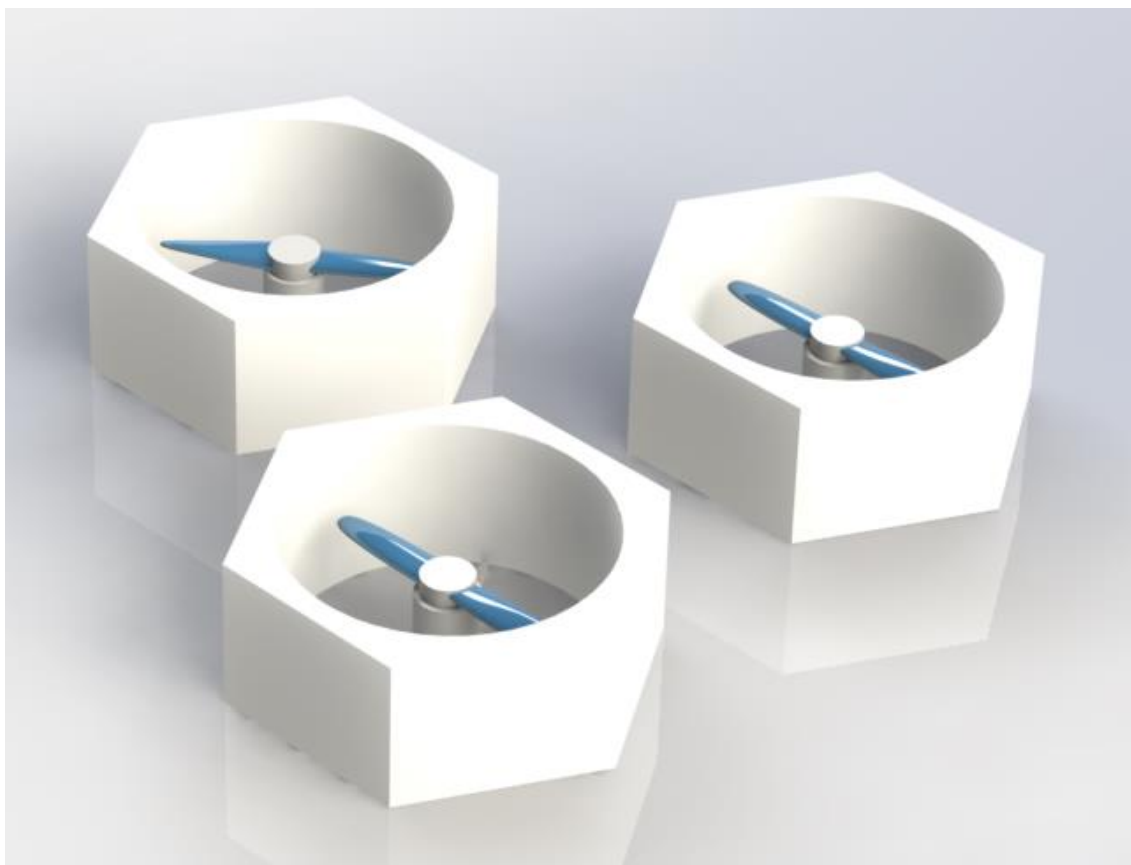


图 7 旋翼模块渲染图

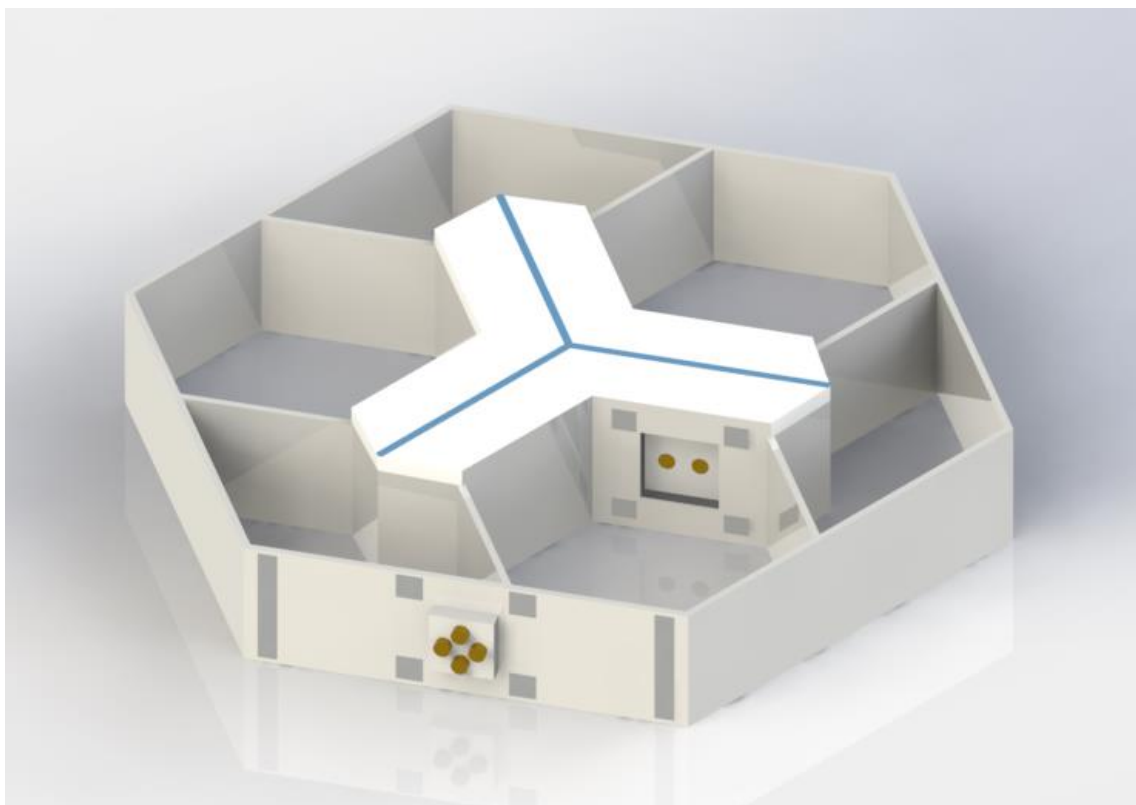


图 8 控制模块渲染图

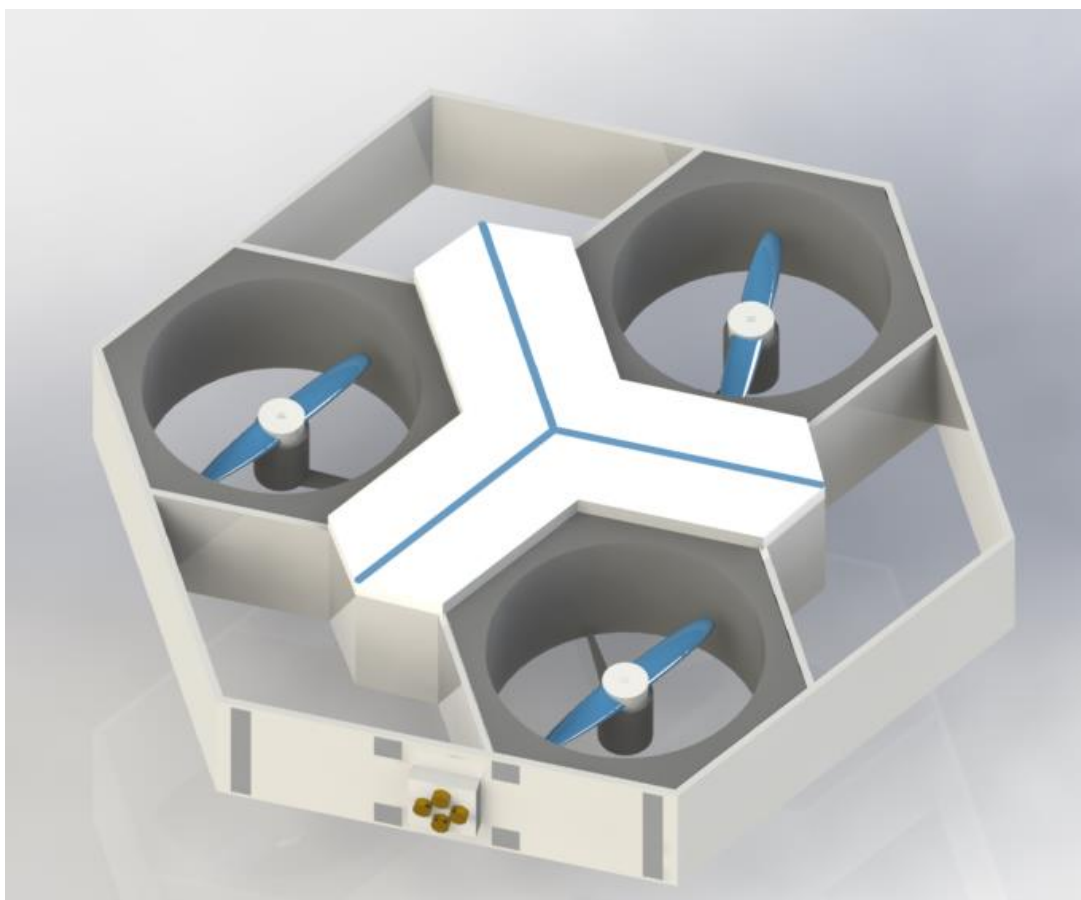


图 9 组合模块渲染图

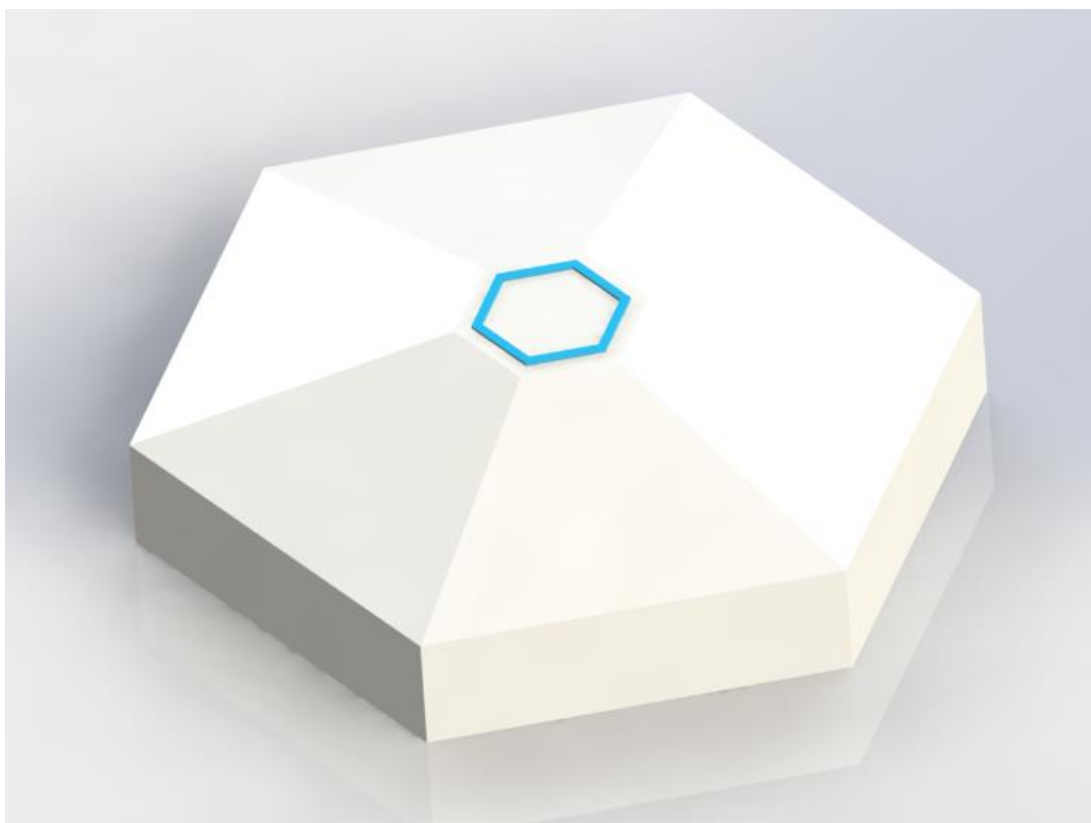


图 10 核心模块（简易）渲染图

3、 布局设计

（1） 多旋翼布局（主要）

以三旋翼和六旋翼飞行器的飞行原理为基础。三旋翼布局如图 9 所示，是一个完整的组合模块，即三旋翼布局，体型较小，可以通过编程实现独立飞行。

每一个组合模块（三旋翼布局），可以简化等效看作一个旋翼模块。

六个组合模块与一个核心模块组合（图 11），形成的多旋翼布局飞行原理与六旋翼飞行器相似。

根据核心模块的不同，飞行器可以执行航拍、监控、空中测量、农药喷洒等任务。如图 12，为组合模块与核心模块（简易）的拼接渲染图。

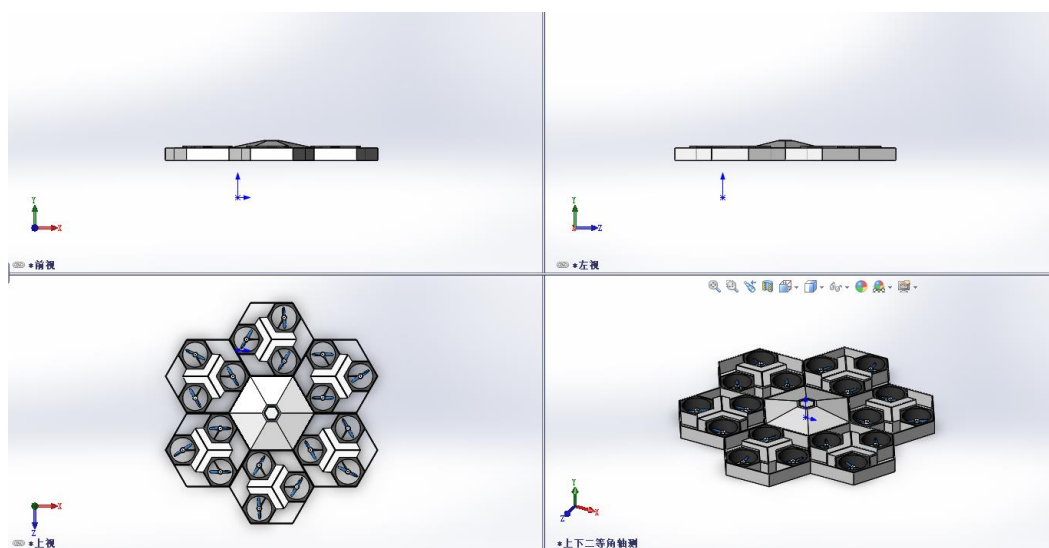


图 11 整机-多旋翼布局（简易）四视图



图 12 整机-多旋翼布局（简易）渲染图

（2） 气动小车布局

在小车上安装不同角度的旋翼模块，以反作用力作为小车前进的动力和提供转向的力。

（3） 气动小船布局

利用的空气动力学原理，通过在小船底部安装旋翼模块使其与地面的摩擦力降低，既可以实现在平坦且平滑的平面上气动前进,又可以在水面上漂浮推进。

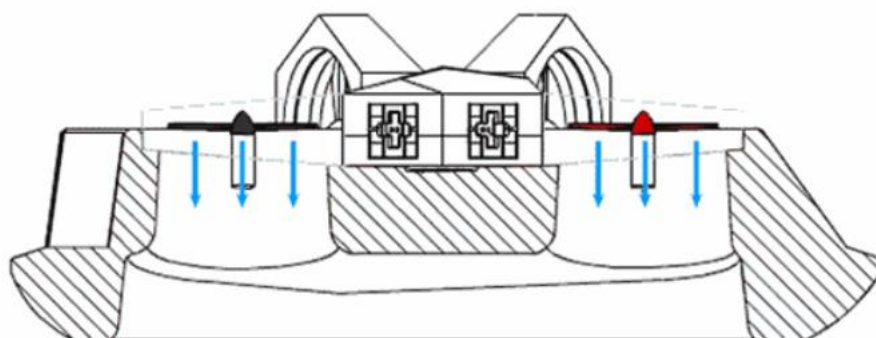


图 13 气动悬浮原理示意图

（三） 功能实现

1、 概述

上文已经提到，本项目多功能化的实现，其关键在于核心模块。通过对核心模块的更改，即实现了不同功能的转化。

现将分别以拍摄监控功能、数据收集检测功能、运输喷洒功能为例，并进行简单介绍。

2、 拍摄监控功能

现如今，许多无人机都已经把航拍功能作为一大卖点，航拍功能在无人机上的应用实现已经非常普遍。

航拍系统包括：图像采集模块、主控模块、通信模块、地面监控模块、航拍云台控制模块等。^[4]

基于本项目，核心模块将装配有航拍云台，需安装摄像头，设置并连接云台、回传等相关装置即可。



图 14 数字摄像头



图 15 航拍云台

3、 数据收集检测功能

利用飞行器空中飞行的特点，可以大范围方便地采集空气样本、测量空中的各项天气数据、PM2.5 浓度、湿度等，并将数据实时传回地面站；通过在不同采样点飞行监测 PM2.5，对整个区域的空气质量构建模型，从而估计整个区域雾霾情况和天气情况。

基于本项目，将传感器、取样器和 PM2.5 监测装置外置与核心模块下方，内幕设置数据分析和回传装置，从而实现了天气数据收集监测的功能。



图 16 PM2.5 检测仪

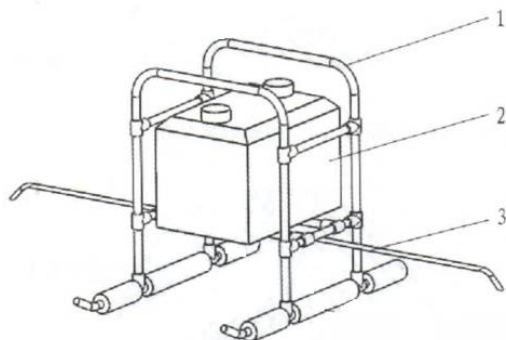


图 17 气象传感器

4、 运输喷洒功能

基于本项目，对起落架进行设计改装，可以具备载物功能。装载农药，安装控制模块，通过遥控在田间喷洒施药是无人机在农业领域的重要用途。

无人机施药，具有诸多优点：雾滴漂移少，作业高度低，防治效果好，旋翼产生的向下气流有助于增加雾滴对作物的穿透性；远距离遥控操作使人员避免了暴露于农药的危害等。无人机施药非常适合中小型田块的病虫害防治和大田内局部精准施药。^[6]



附注 1: 1-起落架; 2-药箱; 3-喷杆

图 18 携农药喷洒式起落架示意图

(四) 控制实现 (难点)

实现对飞行器的控制是本项目的最大难点。

首先, 由于三轴无人机旋翼的布局结构, 它的空气动力是非线性和非定常量的, 要准确建立它的数学模型在理论上是具有一定难度的^[2]。其次, 本项目还包含将三旋翼模块组合视作旋翼的六旋翼飞行器, 尽管理论上具有可行性, 但实践起来具有一定的困难。

为了实现对飞行器的控制, 可以通过建立飞行器的状态方程, 然后应用 PID 控制 (基于偏差的比例、积分和微分控制) 设计飞行器系统的控制。

如图, $r(t)$ 表示预定值, $y(t)$ 是被控对象输出的值, $e(t)$ 是预定值和实际输出值的控制误差, 也是 PID 控制器的输入量, $u(t)$ 表示 PID 控制器的输出量, 同时也是被控对象的输入量。

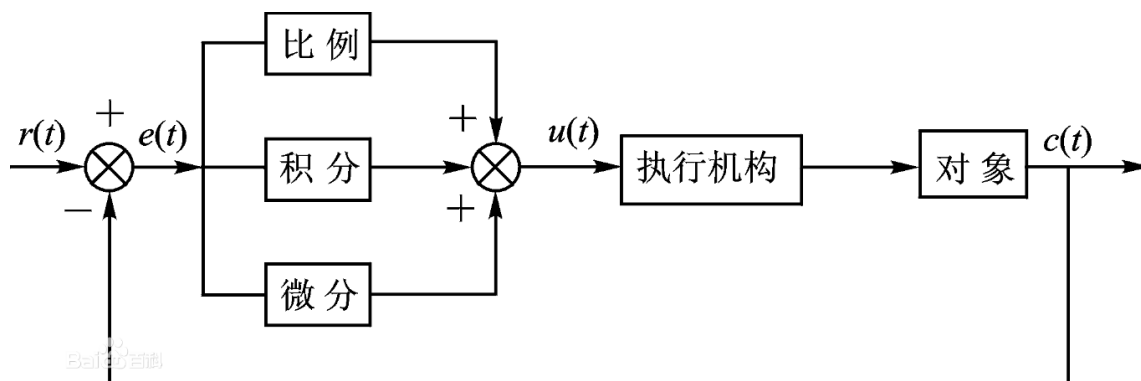


图 19 模拟 PID 控制原理图

完成基于以上原理的分析后，建立飞行状态方程，即可通过飞行器控制板完成飞行器控制系统的硬件设计，从而实现对飞行器的控制。

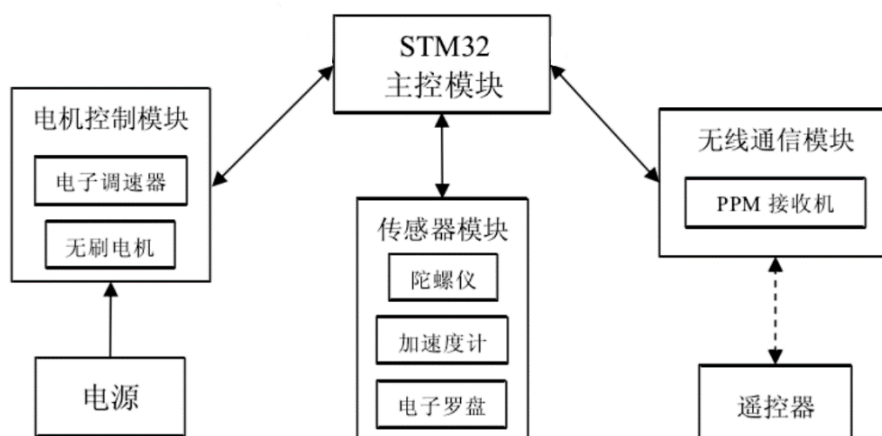


图 20 飞行控制系统硬件结构示意图（简易）



图 21 Kesterl 飞行器控制板

四、应用前景

（一） 应用场景

本项目具有较多元的应用场景，可以满足不同的应用需求。

作为功能性无人机，这款独立模块化多旋翼无人机，既适合普通人航拍用于娱乐，又适合初学者和爱好者 DIY 发挥模块化的价值，还可用于警用监控、气象监测、农用药物喷洒。另外，在编队飞行、飞行表演方面，也有着很大的应用前景

（二） 市场需求

无人机的市场正在日益扩大，其发展前景无疑一片光明。农业、工业、电力，几乎所有的行业对无人机都有需求，而且日益迫切。如图 21，为国内一家权威机

构对当前民用无人机市场的分析预测,可见,无人机的市场需求将呈现稳步递增的趋势。

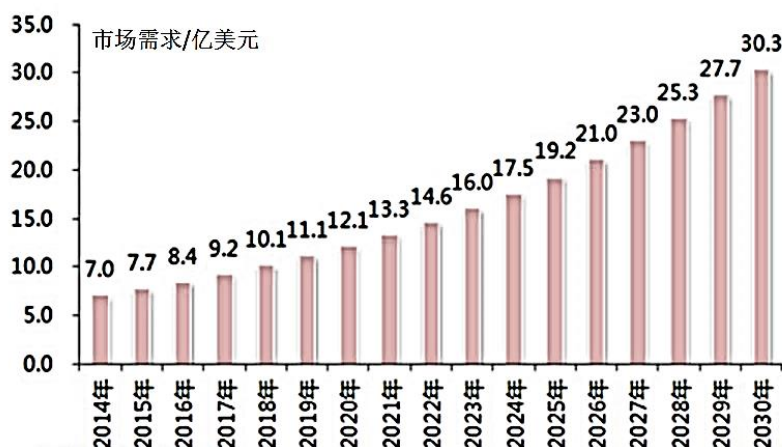


图 22 民用无人机市场需求现状与预测

此外,当前模块化的无人机设计有着从少到多的趋势,关于无人机的创新也在越来越多。

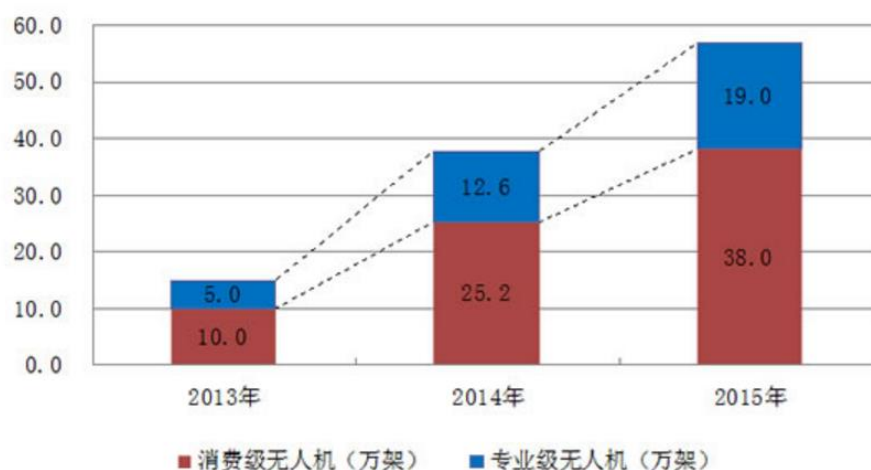


图 23 2013-2015 年全球民用无人机细分市场销量

结论

本项目的精髓在于模块化的设计,其特点、功能、应用均基于灵活的模块。基于模块化的多种功能是一大创新亮点:通过模块的不同拼接,多样的形式和功能得以灵活转化。但若要实现对该飞行器的灵活控制,挖掘其功能,还将面临许多难点和挑战。

参考文献

- [1]杨阳, 崔金峰, 余毅. 三旋翼飞行器动力学分析及建模[J]. 光学精密工程, 2013, 21(7):1873-1880.
- [2]崔金峰. 三旋翼航模飞行姿态的智能控制研究[D]. 长春理工大学, 2013.
- [3]王东平. 基于嵌入式的四轴飞行器控制系统研究与设计[D]. 华侨大学, 2013.
- [4]刘庆, 刘元盛. 直升机模型航拍视频采集传输系统的研制[C]. 全国青年通信学术会议. 2009.
- [5]王强. 小型无人直升机航拍系统设计与实现[D]. 上海交通大学, 2013.
- [6]顾文杰, 贺勇, 王成波, 等. 六旋翼农药喷洒无人机的结构设计[J]. 安徽农业科学, 2015(31):335-337.
- [7]辛冀, 董圣华, 刘毅, 等. 六旋翼无人机的飞行力学建模研究[J]. 飞行力学, 2016(6):10-14.