

基于多用途固定翼飞行器的研究分析

谢辉 金蓓 王淑婷 闫帅 高阳

南京工程学院信息与通信工程学院 江苏 南京 211167

【摘要】结合常见旋翼飞行器飞控系统和导航功能的新型固定翼飞行器的研究正在进行可能性和拓展性应用的尝试,本文仅以项目进行当中选用的飞行器进行有关研究的介绍和展示。本文在进行固定翼飞行器研究背景和内容介绍和分析的基础上,进行其组成和特点要求的阐述,并在具体研究当中,进行有关数学建模,包括了力与力矩方程的建立以及飞控系统功能的意识,以及对涉及到的控制律展开分析。

【关键词】固定翼;控制;飞行

1 绪论

1.1 研究背景和研究意义

现阶段在飞行领域的飞行器,大致可分为旋翼、固定翼以及新型的扑翼结构三种类型,相对于扑翼结构目前处于学术研究起步阶段,而旋翼结构为现下结合人工智能和视觉算法等新型学科内容致使其较为热门而言^[1],较为传统的固定翼结构无人机也在不断拓宽使用空间和使用功能,使其保持着不断创新发展。这其中一个重要的二级方向,是集人工智能计算机技术、自动算法控制于一体的基于多功能固定翼无人机研究成为较为瞩目的课题研究。从固定翼飞行动力学来看待其飞行原理,可以发现其主要是依据了“伯努利原理”“康达效应”“仰角升力”等空气动力学内容,进行结构设计和飞行任务的完成。在现阶段的拓宽应用方向来看,一方面加载飞控系统的固定翼可以使飞机的可靠性和稳定性得到更好地解决,使得其在空中飞行时,尤其是出现乱流的情况下可以很好地进行飞行角度和飞行姿态的调节。在孔德胜的《某型固定翼无人机飞控系统的设计与仿真》一文中,很好地进行了固定翼飞行器有关的飞控系统的介绍和情况分类,主要内容包括了地面站和驾驶仪的搭建,控制律和控制器的设计等。另一方面,基于搭载包括惯性导航系统技术在内的自动运动功能,主要包括飞机的自主起飞,自主造陆,自主导航,重物的定点投掷,地图测绘,自主点位以及航拍监测都获得较大发展^[2]。在唐际钢的《固定翼自动导航飞行控制系统及其使用方法》当中,很好地阐述了固定翼使用功能的拓宽,以及未来使用功能的进一步发展的可能。而在谭建豪的《旋翼飞行器机器人研究进展》一文中,对于固定翼结合旋翼飞行器的优势进行了很好地总结和介绍,可以说结合了新型功能的固定翼无人机,与传统的多轴飞行器相比,其具有操作灵活、速度快、起降简单、续航时间长、成本较

低、功能多和有效载荷多的特点。与此同时,相比于载人使用的固定翼飞机,其研究费用低,更容易维护,减少劳动力等。在民用测绘、物资投放、航拍检测等方面,它能发挥巨大作用,其小型化、智能化以及搭载任务的扩展等特性,使基于机载无人机研究意义非常重大。

1.2 基本研究内容阐述

结合调研工作,可以知晓的是目前涉及固定翼的具体研究内容有如下几点:

- (1) 搭载机体的设计与制作,包括了固定翼的外观模型和相关翼面的设计和制作;
- (2) 飞行控制系统设计,主要涉及采用旋翼飞行时的地面控制站系统和机载控制系统在实现飞行器的飞行与降落;
- (3) 机载硬件的设计与制作,包括了机体上搭建的电机、电源以及控制系统操作模块通过导线进行串联、拼装和飞行效果调试;
- (4) 应急迫降系统的设置,用于在飞行器出现突发情况下可以紧急降落和故障搜集、处理;
- (5) 定位和绘图系统的设置,用于固定翼使用功能的拓宽和延伸,具体内容可以是进行目标定位,将实时捕捉的的视屏图像结合待测区域信息进行数据分析和及时反馈处理,快速地进行捕捉视图和应用地图的分析比较。

从这几点的固定翼在实际制作和功能延伸来看,在目前以及在未来都会对固定翼飞行器小型化、智能化方向发展产生着重大影响^[3],可以说在功能拓宽和应用拓展方面,固定翼飞行器还是很具有未来市场的。本文以项目进行过程当中涉及的一款太阳能充电的多桨翼的多功能固定翼无人机为研究对象,进行相关的飞行控制系统设计以及相关的研制试验。下图为小型太阳能充电多桨翼固定翼无人机的三维模型结构。

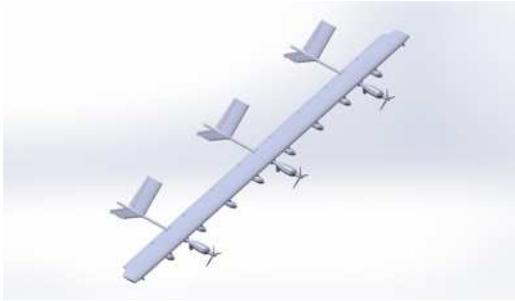


图 1 小型太阳能充电多桨翼固定翼无人机

1.3 固定翼飞行器基本组成

固定翼无人机的基本上是由包括了机身、控制系统（控制舵面）、以及包括螺旋桨在内的动力系统所组成的，另外也可在进行任务飞行时搭载飞控系统和包括摄像头拍摄、视觉飞行在内的任务装置的加载。在飞行进行时，有其动力装置驱动螺旋桨获得向前飞行的动力，而其控制舵面的控制系统进行飞行器升降高度、左右偏航转向等具体飞行功能的展开。控制舵面主要由升降舵、左右副翼和方向舵三部分组成，其中左右副翼由两个舵机直接控制，通过机械调节和微控制器的调节可以实现二者进行同幅度反方向的摆动，而其他舵面则单独由舵机控制^[4]。

由此可知，该类无人机具备以下几个特点：

- (1) 小型固定翼飞行器的机体有限，要求飞行器整体硬件设备的部分合理飞行控制系统的体积尽量小；
- (2) 小型固定翼飞行器承重有限，要求在进行任务飞行时搭载的任务设备重量尽量小；
- (3) 小型固定翼飞行器机载电池容量有限，要求飞行控制系统在进行进行实际工作时的功耗尽量小；
- (4) 小型固定翼飞行器飞行包线小，要求飞行稳定飞行时要通过对于飞控系统的精度准要保持在一定范围内。

2 多用途固定翼系统数学建模

2.1 空气动力学分析

固定翼在空中飞行时，其可在气流坐标系当中展开力的分析，受到三个力即升力 L 、阻力 D 、侧力 C ，这三个力合成作用形成使得固定翼在空中实际作用的综合气动力为 R ，三个力可如下表示：

$$\begin{cases} L = C_L q S \\ D = C_D q S \\ C = C_C q S \end{cases} \quad (1)$$

式中： C_L 为升力系数； C_D 为阻力系数； C_C 为侧力系数； q 为飞行时的压力值； S 为机翼的有效面积。

进行升力、阻力以及侧力的分解计算，是为了在飞行器进行实际飞行时可以更好的得到有关飞行姿态、飞

行速度有关数据和结果比较。

同时，因为是三维坐标系的作用和影响结果，固定翼的综合气动力在飞行运动过程中会和飞行器的质心之间形成一个绕质心转动的合力矩 M ，同样合力矩可在以机体在参考系的机体坐标系中可分解为滚转力矩 M_l 、俯仰力矩 M_m 、偏航力矩 M_n ，可以得到如下的力矩分解方程：

$$\begin{cases} M_l = C_l q S l \\ M_m = C_m q S b_A \\ M_n = C_n q S l \end{cases} \quad (2)$$

式中： C_l 为滚转力矩系数； C_m 为俯仰力矩系数； C_n 为偏航力矩系数； b_A 为平均气动弦长； l 为机翼翼展。

力矩方程的建立和分解，可以在飞行过程中进行瞬间量和过程量进行数据比较时，得到很好地补充作用，从而使得飞行运动更加精确。

2.2 动力系统动力分析

考虑项目进行所使用的固定翼飞行器具有 3 个电机进行运转，其动力分别 T_1 、 T_2 、 T_3 ，总动力 $T = T_1 + T_2 + T_3$ 电机在机体以及机身分布式会产生具有一定安装角，将电机动力分解到机体坐标系当中，得到：

$$\begin{cases} T_x = T \cos \varphi_p \\ T_y = T \sin \varphi_p \\ T_z = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： φ_p 为电机安装角度。

在一般情况下，认为电机的合动力也是经过质心，故而动力力矩为零。

2.3 飞机飞行动力学模型构建

在进行具体的力学分析之前，需要根据基本的物理研究的习惯进行如下假设：

- (1) 飞行器整体视为刚体结构，不考虑飞行时雷诺数、惯性力等因素影响；
- (2) 建立以地面为参考系的惯性坐标系；
- (3) 忽略地球曲率的影响以及重力加速度随高度改变而改变，保持一定值^[5]。

飞机飞行动力学方程建立

包括力方程的建立：

$$\begin{cases} \dot{u} = vr - wq + \frac{\sum F_x}{m_a} \\ \dot{v} = wp - ur + \frac{\sum F_y}{m_a} \\ \dot{w} = wq - vp + \frac{\sum F_z}{m_a} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\sum F_x$ 、 $\sum F_y$ 、 $\sum F_z$ 为合外力在机体坐标系中的 3 个分量； u 、 v 、 w 为飞行速度在机体坐标系中的分量； \dot{u} 、 \dot{v} 、 \dot{w} 为飞行加速度在机体坐标系中的分量； p 、 q 、 r 为飞机角速度在机体坐标系中的分量。

力矩方程：

$$\begin{cases} \dot{p} = \frac{1}{I_x} [M_x + I_{xz}(r + pq)] - (I_z - I_y)qr \\ \dot{q} = \frac{1}{I_y} [M_y + I_{xz}(r^2 - p^2)] - (I_x - I_z)rp \\ \dot{r} = \frac{1}{I_z} [M_z + I_{xz}(p - qr)] - (I_y - I_x)pq \end{cases} \quad (5)$$

式中： I_x 、 I_y 、 I_z 为绕坐标轴转动惯量； I_{xz} 为惯性积； \dot{p} 、 \dot{q} 、 \dot{r} 为角速度分量的变化率。

3 固定翼控制系统组成

3.1 飞控系统组成介绍

固定翼飞行控制技术系统是飞控系统研究当中重要的一项，也是现下结合旋翼控制系统当中的 PID 控制思想往固定翼方向进行尝试的重要内容。从其控制系统的组成模块方面来看，本固定翼飞行器飞行控制系统（见图 2）共包括五个子模块：

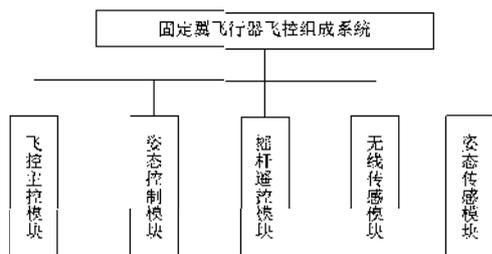


图 2 总体功能结构图

结合模块的功能来看，飞行控制系统工作程序比较多，主要包含位置、加速度高度以及空速等；另外还要实施信息处理、采集信号等任务。在此基础上系统还建立无线通信，主要用来控制信息的接收，实现数据传输和命令控制^[6]。

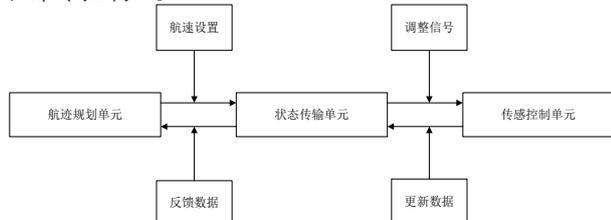


图 3 飞行控制示意图

3.2 固定翼无人机控制律设计

结合旋翼的控制系统设计原则，固定翼的控制系统设计一般包括舵回路、稳定回路和控制回路三部分：

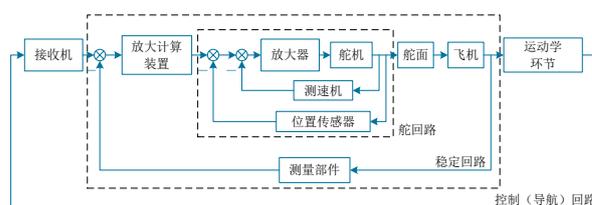


图 4 飞控系统典型控制回路

舵回路，主要是通过输出信号进行负反馈来修改和完善舵机的性能；

稳定回路主要由自动驾驶仪和飞机机体构成，自动驾驶仪用于稳定和控制飞机的姿态，是无人机控制系统的核心^[7]；

控制回路则由稳定回路和能够描述飞机重心位置以及空间位置的运动环节构成，用于稳定和控制飞机的运动轨迹。

对项目进行设计的飞行器进行其控制回路设计时，纵向控制通道主要进行俯仰角、高度和速度的控制；横侧向控制通道则进行滚转角、航向角和飞行轨迹的控制。二者的共同作用可以保证稳定与控制无人机的飞行速度、高度以及保证飞行器可以按照预先设定好的航线飞行。

具体过程中，选择采用升降舵控高、副翼与方向舵控航向角、油门控速的控制方案，在飞行器进行偏转时，设计采用副翼、升降舵、方向舵的联动措施，使得转弯的效率与性能都得以提升。另外，本控制系统借鉴旋翼飞行器的控制模式选择 PID 控制算法。考虑到执行机构的机械特性，在进行控制调节和校正可以考虑加入限幅缓冲环节。

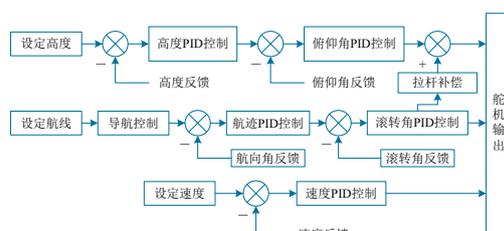


图 5 飞行器控制通道示意图

3.3 固定翼无人机导航系统

无人机导航是按照飞行任务和精度的要求，在一定时间内引导无人机沿着预定的航线到达目的地。其在进行飞行展开前，就需要依据任务飞行的定位点和目标任务精确位置，并在二者之间的空域进行模拟飞行以及实时飞行时需要获得实时位置、速度、航向等导航参数。目前应用在无人机系统中的导航技术主要有惯性导航、卫星导航、多普勒导航、地形辅助导航以及地磁导航等，这些导航技术优缺点各异，可根据无人机的不同任务选

取合适的导航技术。在这仅以惯性导航进行简单介绍，其通过在飞行器上安装陀螺仪来获得实时的姿态角，进一步可以推算出物体运动状态和空间位置，进而测得整个过程的基本运动数据即可实现定位^[8]。现下，很多的导航系统为了精确定位和发挥最大优势，都会将上述几种导航技术适当的组合来取长补短，获得比单一导航技术更高的导航性能，例如美国的“全球鹰”和“捕食者”无人机采用的GPS/INS混合导航技术。GPS优势在于使用方便、成本低，而INS的保密性强、机动灵活，依靠惯性测量装置可输出载体信息，两者的结合改善了系统的精度和抗干扰能力。通常，无人机导航控制原理图如图6所示：

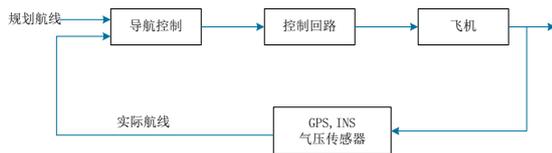


图6 导航控制原理

4 总结

以上为项目进行过程中，涉及到的有关飞行器的相关实验内容，而在进行实践工作的过程中，本项目在研究中的创新性有如下几点：

多桨翼的固定翼创新结构设计，将传统的单桨翼的固定翼飞行器的动力结构使得其在动力学建模过程的力学分析时，需要综合动力的考虑，多桨翼的设计保证了在空中飞行时遇到撞击物即使其动量很大的情况下，仍可以稳定地飞行，不致使在单一桨翼损坏的情况下使得整个飞行器坠毁。

固定翼在控制律的设计时，采用了旋翼飞行器在设计飞行时所考虑的轨迹线路的先期划分，而不是常用小型固定翼人为式操作，在飞行定位精度方面将会有较大

改进。

在功能性上，为了使得该固定翼飞行器可以更好地进行功能的展示，在可能的情况下将设置太阳能光伏板的安装，尽可能实现电源的自动供应，从而可以实现远距离、长时间的飞行。

固定翼飞行器结合常见飞行器功能和性能进行创新发展，就目前来说还仅仅是个开始，未来更多的固定翼机型会获得技术性突破，将更多的结构和控制系统进行研发创新。本文仅以项目进行内容进行有关介绍和阐述，希望对有关研究提供一定的帮助。

【参考文献】

- [1] 吴汉平等译. 无人机系统导论 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [2] 景岩. 无人机发展综述 [J]. 才智, 2013(16).
- [3] 刘媛媛. 垂直起降固定翼无人机设计、控制与试验 [D]. 江苏: 南京航空航天大学, 2018.
- [4] 杨敏. 无人机飞行路线控制系统设计 [D]. 四川: 成都理工大学, 2016.
- [5] 张航, 宋笔锋, 王海峰, 王耿. 电动固定翼无人机动力系统建模与优化设计 [J]. 航空动力学报, 2019, 34(06): 1311-1321.
- [6] 申祖辉. 基于STM32的四旋翼无人机控制系统设计 [D]. 河南: 河南科技大学, 2019.
- [7] 李一波, 李振, 张晓东. 无人机飞行控制方法研究现状与发展 [J]. 飞行力学, 2011, 29(2).
- [8] 高丽丽. 固定翼无人机总体设计及自主着陆控制技术研究 [D]. 江苏: 南京航空航天大学, 2017.

项目基金：南京工程学院 2020 年大学生科技创新基金项目（TB202006002）；南京工程学院高层次引进人才科研启动基金（YKJ201866）

通讯作者：高阳

单位：南京工程学院 人工智能产业技术研究院