

基于稳定控制的四旋翼飞行器建模研究分析

左卓¹ 岳洪伟¹ 马诗会²

1 山东交通学院 2 燕山大学

DOI:10.12238/acair.v2i4.10360

[摘要] 随着航空技术的发展,飞行器在飞行过程中面对各种不确定性因素的影响,如气象变化、飞行载荷变化、系统故障等因素的影响均会影响其稳定飞行。因此,为解决以上问题本文通过分析如何在不确定条件下实现飞行器的稳定优化控制,以及分析飞行器可能遇到的不确定性因素,包括外部环境的不确定性(如风速、风向变化),内部系统的不确定性(如发动机性能波动、结构损伤),和操作过程中的不确定性等因素。通过建立飞行器飞行坐标模型,模拟这不确定性对飞行器动态特性的影响,维持在在最坏情况下飞行器的稳定性和性能。确保四旋翼飞行器的稳定运行控制。

[关键词] 飞行器; 动力模型; 稳定控制

中图分类号: TN972+.42 **文献标识码:** A

Research on modeling and analysis of four-rotor aircraft based on stability control

Zhuo Zuo¹ Hongwei Yue¹ Shihui Ma²

1 Shandong Jiaotong University 2 Yanshan University

[Abstract] With the development of aviation technology, the aircraft needs to face various uncertainties in the design and operation process, such as meteorological changes, flight load changes, system failures, etc. These uncertainties have a significant impact on the stability and performance of the aircraft. Therefore, it is of great significance to study how to realize the stability optimization control of the aircraft under these uncertain conditions. This paper analyzes the uncertainty factors that the aircraft may encounter, including the uncertainty of the external environment (such as wind speed, wind direction change), the uncertainty of the internal system (such as engine performance fluctuation, structural damage), and the uncertainty in the operation process. By establishing the flight coordinate model of the aircraft, the influence of this uncertainty on the dynamic characteristics of the aircraft is simulated to ensure the stability and performance of the aircraft in the worst case.

[Key words] aircraft; dynamic model; stability control

引言

自首架四旋翼无人机试飞成功以来,飞行器在轻量化、控制技术、飞行时间和机动性等方面均有显著提升。由于四旋翼无人机的动力学和结构相对简单,已被大规模生产并广泛应用于多个领域,包括摄影、货物运输、地理测绘和勘探等。四旋翼无人机已成为最普遍的无人机类型之一,为了进一步提升其性能,众多研究致力于改善四旋翼无人机的控制方法等各方面研究,不仅包括对其飞行控制的深入研究,还涉及减轻机体重量等其他改进措施。例如,文献1中提到了提高转子和螺旋桨的效率、增加电池容量以及优化多转子结构。到目前为止多旋翼无人机,尤其是四旋翼无人机的转子位置优化尚未受到研究者的广泛重视。然而,它们在抵御干扰和应对故障时展现出的潜力,使得这一领域具有研究和开发的價值。已有研究探讨了臂长可变的无人机,其控制策略通过调整无人机的臂长并保持旋翼速度不变

来实现。此外,研究还展示了一种具有类似结构的四旋翼飞行器,证明四旋翼飞行器能够利用这种能力携带更大的有效载荷。

在文献2中,无人机的运动方程和控制算法并未考虑臂长变化的限制。同时,当前研究也未涉及如何在飞行操作中确定每个臂的最优长度,而是通过几种预定义的模式进行模拟。最新的研究开始考虑转子定位的影响,并对可定位转子四旋翼的动力学进行了建模。这种可定位转子四旋翼无人机能够沿臂轴线性调整其转子位置,所提出的控制器由自适应倒推有限时间控制器和转子定位单元两个相互连接的部分组成,利用自适应控制器的输出来计算每个转子的最佳位置。尽管这一领域已有一定的研究进展,但在多旋翼无人机中转子定位仍是一个新兴领域,需要进一步的探索和研究。

1 四旋翼飞行器研究现状

在当前文献研究主要考虑模糊PID控制器和转子定位,以利用基于对数屏障函数的控制分配算法稳定四旋翼无人机。为四

旋翼无人机的过渡驱动结构提出了一种使用凸优化方法的控制分配算法,该算法在稳定无人机时将较少的控制输入分配给更多执行器。

鉴于四旋翼飞行器具有动力学欠驱动的特性,以及其模型中不同自由度间存在非线性耦合,文献3中提出了一种非线性控制方法来应对模型参数的不确定性。作者通过采用自适应屏障函数,确保了模型中不确定性的快速收敛。在四旋翼飞行器的控制领域,可根据所采用的控制策略对其进行分类,每种策略都有其独特的优势。常见的研究方法包括自适应鲁棒控制、反步法和PID(比例-积分-微分)控制。以下是该领域一些具体的研究方法:

(1) 基于高阶滑模观测器,开发一种针对四旋翼飞行器的有限时间超扭滑模控制策略,该策略利用观测器的输出来实现有限时间超扭滑模控制,确保跟踪误差在有限时间内收敛,并有效抑制颤振现象。(2) 通过采用适用于具有动态不确定性和时变外部干扰的四旋翼飞行器的鲁棒自适应多级控制方法,并通过数值模拟验证了控制器的有效性。(3) 研究一种考虑位置和姿态动力学耦合的四旋翼飞行器的适应性控制器,该控制器基于模型前馈补偿的精确参数化,并通过比较分析评估了控制系统的性能。

尽管PID控制器在许多商业应用中被广泛使用,包括新型飞行控制器,但文献综述显示,PID算法仍然是一个有吸引力且有改进空间的方法。尽管它在最新研究中不是一个热门领域,类似于适应性或滑模控制。此外,由于多旋翼无人机在不稳定和风力条件下的性能通常比固定翼无人机差,因此有必要更加关注解决这一问题。除了提升控制器算法和多旋翼部分的性能外,还可以改进它们的整体结构。

2 飞行器转子可定位四轴器动力模型

本节推导出线性动量和角动量,并考虑牛顿第二定律,计算出它们的导数,得到四元运动方程。

四旋翼飞行器中每个臂的重量和每个臂转子与四旋翼机垂直轴之间的距离分别用 m 和 l 表示($i=1, 2, 3, 4$),此外,四旋翼机不带臂的重量被考虑为 M 。因此,在体坐标系中,线性动量矢量 \vec{G} 可以表示为:

$$\begin{aligned} \vec{G} &= \sum m_i \vec{v}_i = M\vec{v} + m(\vec{v}_1 + \vec{v}_2 + \vec{v}_3 + \vec{v}_4) \quad (1) \\ \vec{G} &= M\vec{v} + m \left[\left(\vec{v} + l_1 \hat{e}_1 - l_1 \dot{\psi} \hat{e}_2 + l_1 \dot{\theta} \hat{e}_3 \right) \right. \\ &+ \left(\vec{v} - l_2 \hat{e}_2 - l_2 \dot{\psi} \hat{e}_1 - l_2 \dot{\phi} \hat{e}_3 \right) + \left(\vec{v} - l_3 \hat{e}_1 + l_3 \dot{\psi} \hat{e}_2 - l_3 \dot{\theta} \hat{e}_3 \right) \\ &+ \left. \left(\vec{v} + l_4 \hat{e}_2 + l_4 \dot{\psi} \hat{e}_1 + l_4 \dot{\phi} \hat{e}_3 \right) \right] \quad (2) \\ &= (M+4m)\vec{v} + m \left[\left(\dot{l}_1 - \dot{l}_3 + \dot{\psi}(l_4 - l_2) \right) \hat{e}_1 \right. \\ &+ \left. \left(\dot{l}_4 - \dot{l}_2 + \dot{\psi}(l_3 - l_1) \right) \hat{e}_2 + \left(\dot{\theta}(l_1 - l_3) + \dot{\phi}(l_4 - l_2) \right) \hat{e}_3 \right] \end{aligned}$$

其中四重陀螺及其转子的平移速度矢量用 \vec{v} 和 \vec{v}_i 表示:

$$\begin{aligned} (i=1, 2, 3, 4), \dot{\phi}, \dot{\theta} \text{ 和 } \dot{\psi} \text{ 分别是欧拉角(滚角, 俯仰角和偏航} \\ \text{角)。此外, } \hat{e}_i (i=1, 2, 3, 4) \text{ 是四转子体坐标系的单位向量。通} \\ \text{过微分(2), 忽略重力的四元运动平移方程可以计算为} \\ \sum \vec{F} = d\vec{G} / dt \rightarrow \sum \vec{F} = (M+4m)\dot{\vec{v}} \\ + m \left[\left(\ddot{l}_1 - \ddot{l}_3 + \dot{\psi}(l_4 - l_2) + \dot{\psi}(\dot{l}_4 - \dot{l}_2) \right) \hat{e}_1 \right. \\ + \left(\ddot{l}_4 - \ddot{l}_2 + \dot{\psi}(l_3 - l_1) + \dot{\psi}(\dot{l}_3 - \dot{l}_1) \right) \hat{e}_2 \\ + \left. \left(\ddot{\theta}(l_1 - l_3) + \ddot{\phi}(l_4 - l_2) + \dot{\theta}(\dot{l}_1 - \dot{l}_3) + \dot{\phi}(\dot{l}_4 - \dot{l}_2) \right) \hat{e}_3 \right] \\ + \omega \times (M+4m)\vec{v} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{m}{(M+4m)} \left(\ddot{z}_3 - \ddot{l}_1 + \dot{\psi}(l_2 - l_4) + \dot{\psi}(\dot{l}_2 - \dot{l}_4) \right) + v_z \dot{\theta} - v_y \dot{\psi} \\ a_y &= \frac{m}{(M+4m)} \left(\ddot{l}_2 - \ddot{l}_4 + \dot{\psi}(l_3 - l_1) + \dot{\psi}(\dot{l}_3 - \dot{l}_1) \right) + v_x \dot{\psi} - v_z \dot{\phi} \\ a_z &= \frac{1}{(M+4m)} \left(u_1 + m \left(\ddot{\theta}(l_3 - l_1) + \ddot{\phi}(l_2 - l_4) \right) \right) + v_y \dot{\phi} - v_z \dot{\theta} \quad (4) \end{aligned}$$

其中 $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$ 是四旋翼飞行器在体坐标系中的速度向量。为了获得固定地球坐标系中的运动转换方程,必须将欧拉旋转矩阵(R)乘以(4)两边的表达式。

$$R = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi & s\phi s\psi + c\phi s\theta c\psi \\ c\theta s\psi & s\phi s\theta s\psi + c\theta c\psi & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \ddot{x} = a_x R_{11} + a_y R_{12} + a_z R_{13} \\ \ddot{y} = a_x R_{21} + a_y R_{22} + a_z R_{23} \\ \ddot{z} = a_x R_{31} + a_y R_{32} + a_z R_{33} - g \end{cases} \quad (6)$$

其中 s 和 c 分别是 \sin 和 \cos 。为了获得飞行器旋转运动方程,可以通过计算角动量来使用类似的方法。

3 飞行控制特性

(1) 四旋翼无人机是一种具有非线性、强耦合特性的欠驱动和时变控制系统。通过调整四个电机的转速,这种无人机能够控制其六个自由度的运动状态,包括三个平移方向的线运动和三个旋转方向的角运动。因此,四旋翼无人机是一个典型的欠驱动系统,需要通过四个输入(电机转速)来操控六个自由度的输出,

这些输出之间存在着高度的耦合性。在设计飞行控制系统时,必须考虑到无人机是一个具有不可积分约束的非线性系统,并确保控制系统具备有效的解耦能力。(2)四旋翼无人机容易受到内部和外部因素的干扰。由于其尺寸小、重量轻,其容易受到电机高速旋转时产生的振动影响。在飞行过程中,四旋翼无人机还会受到气流变化等外部扰动的影响,且多数四旋翼无人机的旋翼采用柔性材料,在风的作用下容易发生形变,从而改变其原有的气动特性。因此,在设计控制系统时,需要充分考虑这些干扰因素,深入分析四旋翼无人机在受扰动环境中的飞行动力学特性,并针对不同的扰动采取相应的控制策略。

未来的智能化四旋翼无人机不仅要实现自主飞行,还需要具备自主决策的能力,能够利用搭载的传感器实时分析周围环境,并对环境中的动态和不确定因素做出快速反应和处理,实现自主避障、航迹规划和导航等功能。近两年来,许多新的尝试和探索正在不断推进四旋翼无人机智能化的发展。

本文分析了具备转子定位功能的四旋翼无人机的控制分配问题和模糊故障切除能力。鉴于这类四旋翼无人机属于过度驱动系统,并分析了一种基于凸优化和对数障碍函数的控制分配算法,用以确定各旋翼的位置和旋转速度。研究还涉及了无人机在假设旋翼可能部分失效的情况下的故障容忍控制策略。当监测到旋翼速度下降等故障迹象时,利用预定义的模糊规则重新计算故障旋翼的位置,以补偿故障影响。通过建模分析表明转子定位技术不仅减少了四旋翼飞行器在抵抗干扰时的能量消耗,还显著提升了其承受最大干扰的能力。此外,研究还证明了即使

在干扰存在的情况下,转子定位也能增强四旋翼飞行器的故障容忍性能。

4 结论

飞行器技术在多个领域取得了显著进步,包括飞行控制、动力系统、材料科学和航空电子等。在稳定性与控制方面,通过先进的控制算法和飞行动力学分析,飞行器的稳定性和操控性能得到了显著提升,尤其是在面对复杂环境和不确定性条件下。在安全性提升方面表明,通过改进设计和增加冗余系统,飞行器的安全性得到了增强,减少了事故发生的风险。

[参考文献]

[1]周贤祺,徐锦法.倾转四旋翼飞行器三维过渡走廊分析与过渡路径确立[J].航空工程进展,1-10.

[2]张叶,钟诚,王云涵.基于Qball-X4的四旋翼飞行器自适应控制[J].控制工程,2024,31(08):1512-1521.

[3]洪宇奇,张倩瑜,胡欣雨.基于模糊控制的四旋翼飞行器稳定性仿真分析[J].集成电路应用,2024,41(08):96-97.

作者简介:

左卓(2005--),男,汉族,山东青岛人,本科生,山东交通学院。

岳洪伟(1987--),女,汉族,山东枣庄人,博士/讲师,山东交通学院。

马诗会(1992--),女,汉族,辽宁省本溪人,燕山大学,博士/副教授,研究方向:天然气水合物开采。