

四旋翼无人机轨迹跟踪控制研究综述

朱新宇 詹宇成 陈诗亮 孙雅茹
中国民用航空飞行学院 四川 成都 641419

摘要: 四旋翼无人机因其非线性、耦合和欠驱动的特性而具有灵活的飞行特性和优异的控制性能, 因此被广泛应用于各类任务中。四旋翼无人机作为一种不稳定系统, 需要对其进行高效智能的控制。本文对不同的控制方法进行了全面的总结, 首先, 概述了四旋翼无人机的工作原理和不同的应用。其次, 总结了四旋翼飞行器的数学模型。然后对现有常用的控制技术展开了全面的概述和深入剖析, 最后, 对无人机轨迹跟踪控制的发展趋势进行了展望。

关键词: 无人机; 四旋翼飞行器; 轨迹跟踪控制

引言

在过去几十年中, 无人机技术取得了显著进展^[1]。随着低空经济的快速发展, 四旋翼无人机因结构简单、操控灵活、成本较低, 已成为最常见且应用最广泛的无人机类型之一。其应用范围不断扩大, 在物流运输、快递配送、农业植保、环境监测和航拍等民用领域发挥着重要作用^[2]。例如, 在物流领域, 无人机配送正在全球逐步推广; 在农业领域, 无人机能够执行农药喷洒和作物监测等任务, 提高作业效率并降低人力成本; 在工业领域, 四旋翼无人机被广泛应用于电力巡检、基础设施检测及能源设备巡查等场景, 依靠灵活的飞行能力和高效的图像采集系统, 为复杂环境下的作业提供了安全且经济的解决方案。

四旋翼无人机是一种依靠四个旋翼产生升力的垂直起降飞行器。与传统单旋翼直升机和固定翼飞机相比, 其能够实现垂直起降和悬停, 不依赖跑道, 能够在狭小或复杂环境中起降, 因此在多样化任务中具有显著优势^[3]。随着无人机技术的发展, 四旋翼无人机不仅在民用和军事领域得到广泛应用, 也逐渐成为验证新型制导、导航与控制算法的重要实验平台。研究人员通过该平台开展姿态稳定、轨迹规划及避障控制等方面的研究, 以提升无人机系统的整体性能。

在四旋翼无人机控制系统中, 轨迹跟踪控制技术是保证无人机稳定飞行和准确执行任务的关键。其核心目标是使无人机能够沿预设轨迹精确飞行, 并在外部扰动和环境变化下保持稳定。随着无人机在自动化物流和精准农业等复杂任务中的应用不断增加, 对轨迹跟踪精度和实时性的要求也持续提升。为此, 研究人员引入自适应控制与鲁棒控制等先进方法, 以提高系统在风速变化

和参数不确定条件下的稳定性和可靠性。总体而言, 轨迹跟踪控制技术的发展对提升无人机任务执行效率和飞行安全性具有重要意义^[4]。

1 四旋翼无人机

无人机地连坐标系将地球表面假设成一张平面, 通常以四旋翼起飞位置或地心位置作为坐标原点O, X轴在水平面内指向某一方向, Z轴垂直地面向下, 按照右手定则确定Y轴。无人机机体坐标系的坐标原点O在四旋翼无人机的重心位置上, X轴在多旋翼对称平面内指向机头, Z轴在飞机对称平面内垂直向下, 按照右手定则确定Y轴。机体坐标系与地连坐标系之间的夹角被称为无人机的欧拉角, 可用横滚角(roll)、俯仰角(pitch)、偏航角(yaw)三个角表示, 其中横滚角 ϕ 为飞机对称平面与通过飞机机体纵轴的铅垂平面间的夹角, 右滚为正; 俯仰角 θ 为机体轴与水平面之间的夹角, 飞机抬头为正; 偏航角 ψ 为机体轴在水平面上的投影与地轴之间的夹角, 以机头右偏为正。

采用Newton-Euler或Euler-Lagrange对无人机进行建模时, 为了方便对无人机所受的力进行受力分析必须考虑以下假设:

- (1) 四旋翼结构必须对称且为刚体, 其质量和转动惯量保持不变
- (2) 忽略陀螺转子效应
- (3) 四旋翼坐标系原点与质心重合, 且运动过程中质量保持不变

在此基础上建立的四旋翼无人机的状态方程如(1)式所示, 四旋翼无人机的非线性模型如(2)式所示:

$$6DOF = [x, y, z, \phi, \theta, \psi] \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\varphi} \\ \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I_y - I_z}{I_x} \dot{\theta} \dot{\varphi} + \frac{I_r}{I_x} \dot{\theta} \omega_{sum} + \frac{1}{I_x} U_2 \\ \frac{I_z - I_x}{I_y} \dot{\phi} \dot{\varphi} - \frac{I_r}{I_y} \dot{\phi} \omega_{sum} + \frac{1}{I_y} U_3 \\ \frac{I_x - I_y}{I_z} \dot{\phi} \dot{\theta} + \frac{1}{I_z} U_4 \\ -\frac{U_1}{m} (\sin \theta \cos \phi \cos \varphi + \sin \theta \sin \varphi) \\ -\frac{U_1}{m} (\sin \theta \cos \phi \sin \varphi - \sin \theta \cos \varphi) \\ -\frac{U_1}{m} \cos \theta \cos \phi + g \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, x 、 y 、 z 为无人机在三个方向上的位置; ϕ 、 φ 、 θ 为无人机的欧拉角, 分别称为俯仰、偏航和滚转; m 为无人机的质量; I_x 、 I_y 、 I_z 分别为无人机的转动惯量; I_r 为旋翼的转动惯量; g 为重力加速度; ω_{sum} 为四旋翼无人机四个旋翼的转速代数合即 $\omega_{sum} = \omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4$; U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 为系统的四个虚拟控制输入, 其定义为(3)式所示:

$$\begin{cases} U_1 = b(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \\ U_2 = lb \left(-\frac{\sqrt{2}}{2} \omega_1^2 + \frac{\sqrt{2}}{2} \omega_2^2 + \frac{\sqrt{2}}{2} \omega_3^2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \omega_4^2 \right) \\ U_3 = lb \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \omega_1^2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \omega_2^2 + \frac{\sqrt{2}}{2} \omega_3^2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \omega_4^2 \right) \\ U_4 = d(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \end{cases} \quad (3)$$

式中, b 为升力系数; d 为旋翼的阻力系数; l 为旋翼轴到无人机质心的距离。

2 四旋翼无人机控制算法

在过去的几十年中, 四旋翼无人机逐渐成为许多重要应用中的关键工具。为了确保这些无人机能够安全高效地执行任务, 研究人员探索并开发了多种先进的控制技术^[5]。这些控制方法的选择通常取决于任务的具体要求, 例如实现悬停时的稳定性、精准的直线或圆形轨迹跟踪、复杂的机动飞行以及避免障碍物等。要实现这些复杂的控制目标, 控制算法不仅需要能够灵活应对不断变化的飞行环境, 还需要能处理无人机系统参数的不确定性和扰动^[6]。为此, 不同类型的控制策略已被提出并成功应用于四旋翼无人机, 各种控制方法的特点和细节将在下文详细说明。

2.1 PID算法

目前处理控制问题的算法多种多样, 但是比例-积分-

微分(PID)控制是最常用、最经典的线性控制器。PID控制器具有结构简单、性能好和参数容易调整等特点^[7]。PID控制器通过对系统误差 $e(t)$ 的计算和调节, 实现对控制目标的精确调节和稳定控制。PID控制的核心思想是根据当前的误差值以及误差的历史和变化趋势, 调节控制输出, 使系统达到预期的状态。式(4)为PID控制算法的数学模型:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

PID控制器需要调整三个参数: 比例增益(K_p)、导数增益(K_i)和积分增益(K_d), 比例控制根据当前误差(设定值与实际值的差值)直接调整控制输出。其输出与误差成正比。比例控制的作用是快速响应误差, 减小系统偏差, 但如果只使用P控制, 系统可能无法完全消除误差, 且可能会引起震荡; 积分控制累积误差随时间的总和, 用于消除系统中的稳态误差(系统长期保持的小偏差)。积分控制通过累加过去的误差逐渐增加控制输出, 确保系统最终达到设定值, 但过多的积分作用可能导致系统反应迟缓或振荡; 微分控制根据误差变化的速度进行调节, 主要用于预测系统的误差趋势, 提前进行调整。微分控制能够减缓误差变化的速度, 提升系统的稳定性, 减少超调现象。但过强的D控制可能对噪声敏感, 导致系统不稳定。

2.2 MPC算法

MPC(模型预测控制)算法逻辑的核心是基于系统的动态模型, 在每个时刻滚动地预测未来一段时间的系统行为, 通过在线寻找最优控制来减少对未来的误差^[8]。MPC需要一个系统的动态模型, 用来预测未来的状态。这种模型可以是线性模型、非线性模型、离散模型或连续模型。常见的形式为离散状态空间模型:

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) \quad (5)$$

式中 $x(t)$ 是系统的状态向量; $u(t)$ 是控制输入; A 和 B 是系统的状态矩阵, 这个模型用来预测系统在未来时刻的行为。在每个时刻 t , MPC算法会基于当前系统状态 $x(t)$ 和动态模型, 预测未来预测时域的系统状态变化, 若预测时域长度为 N , 即预测未来 N 个时间步长的系统状态: $x(t+1), x(t+2), \dots, x(t+N)$, 这些系统状态是通过计算出不同的控制输入(控制时域) $u(t+1), u(t+2), \dots, u(t+N-1)$ 预测出来的。在MPC算法中, 控制时域长度不能大于预测时域。

MPC的控制目标通常是 minimized 系统的偏差和控制输入的代价。这通过定义一个代价函数来实现, 形式为:

$$J = \sum_{t=0}^{N-1} (x(t) - x(t)_{ref})^T Q(x(t) - x(t)_{ref}) + (u(t) - u(t)_{ref})^T R(u(t) - u(t)_{ref}) \quad (5)$$

式中, x_{ref} 是系统的目标状态; u_{ref} 是系统的期望控制输入。优化目标是 minimized 这个性能指标 J , 即找到一组控制输入 $u(t), u(t+1), \dots, u(t+N-1)$, 使得系统尽可能接近目标状态, 同时尽量减少控制输入的使用或波动。在每个时刻 t , MPC通过求解一个优化问题来得到未来一段时间的最优控制输入序列, 然后只选取最优控制序列的第一个输入 $u^*(t)$ 作为控制输入, 然后, 系统状态更新为 $x(t+1)$, 下一步MPC会以新的状态 $x(t+1)$ 重新求解优化问题。这个过程在每个时间步长滚动进行, 因此称为“滚动优化”。

MPC在处理多变量、受约束的复杂系统中表现优越, 并且由于其滚动优化和反馈机制, 能够适应动态变化的环境。

2.3 强化学习控制

基于强化学习的控制是指学习在特定情况下执行任务以做出更好的响应。与传统的控制方法不同, 强化学习控制不依赖于系统的精确模型, 而是通过试错和奖励机制来优化策略。它特别适合处理复杂的、非线性、时变的系统, 尤其是在模型不易获得或不确定的情况下。因此该方法对动态不确定性和外部干扰具有很强的鲁棒性^[9]。

强化学习的目标是最大化某个初始状态 s_0 开始执行动作序列 a_0, a_1, \dots , 所获得的总奖励。对于每个时间 t 积累奖励定义为:

$$G_t = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k} \quad (6)$$

引入了价值状态函数 $V(s)$ 和动作价值函数 $Q(s, a)$, 状态价值函数表示在状态 s 下使用策略后预期累积奖励; 动作价值函数表示在状态 s 下, 执行动作 a 后得预期累积奖励。两种价值函数得公式为:

$$\begin{aligned} V(s) &= E_{\pi} \langle G_t | s_t = s \rangle \\ Q(s, a) &= E_{\pi} \langle G_t | s_t = s, a_t = a \rangle \end{aligned} \quad (7)$$

强化学习通过反复评估和改进策略来逐渐优化控制效果, 根据当前策略 π 来评估状态价值函数或动作价值函数, 然后通过选择最优动作来提升策略。常见的更新方式有Q-learning和策略梯度方法两种。Q-learning通过迭代方法直接更新 Q 值, 其公式为:

$$Q(s_t, a_t) = Q(s_t, a_t) + \alpha \left(r_t + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t) \right) \quad (8)$$

在强化学习控制中, 系统既要探索新的动作, 以便发现可能更优的策略, 也要开发当前最优策略。常用的探索策略有 ϵ -greedy策略和软策略, ϵ -greedy策略以 ϵ 的概率选择随机动作进行探索, 以 $1-\epsilon$ 的概率选择当前估计最优动作进行开发; 软策略如Boltzmann分布策略, 基于动作的价值 $Q(s, a)$ 选择动作, 但会随着时间更倾向于选择高价值动作。

强化学习控制的过程通过不断与环境交互, 更新策略和价值函数, 最终收敛到一个最优策略。

3 总结

本文对常见不同无人机轨迹跟踪控制方案的结果进行了综述, 并将其纳入无人机的系统建模和控制中。本文的研究为无人机轨迹跟踪控制领域提供了系统化的参考, 帮助研究人员和工程师更好地理解各种控制策略的原理和适用性。这不仅对提升现有无人机技术的稳定性、精度和鲁棒性具有重要意义, 也为未来无人机技术的进一步发展和广泛应用奠定了坚实基础。

参考文献

- [1]段海滨,梅宇,赵彦杰,等.2023年无人机热点回眸[J].科技导报,2024,42(01):217-231.
- [2]许宁宁.探索通感一体低空经济等新应用场景[N].南方日报,2024-10-17(A06).
- [3]方亚丽.低空经济迎“风”起飞[J].当代贵州,2024,(35):8-9.
- [4]徐柏洋,高先涛,杜夏燕,等.农业植保无人机应用效果研究[J].农业灾害研究,2024,14(08):22-24.
- [5]张长箭,张帆,朱正吼,等.四旋翼无人机建模及模糊PID控制[J].南昌航空大学学报(自然科学版),2024,38(02):39-48.
- [6]全权,戴训华,王帅.多旋翼飞行器设计与控制实践[M].北京:电子工业出版社,2020.
- [7]冯立杰,邓坤鹏,张虎翼.基于双闭环模糊PID四旋翼无人机姿态控制[J].计算机仿真,2024,41(08):19-24+373.
- [8]张鑫,吴伊凡,崔永琪.基于改进MPC算法的四旋翼无人机轨迹跟踪控制[J].电子技术与软件工程,2023,(03):148-153.
- [9]董豪,杨静,李少波,等.基于深度强化学习的机器人运动控制研究进展[J].控制与决策,2022,37(02):278-292. DOI:10.13195/j.kzyjc.2020.1382.