

小型固定翼无人机飞行控制系统的抗干扰设计研究

罗 美

石家庄海山实业发展有限公司 河北石家庄 050200

摘 要: 由于具有灵活机动和低成本的特点, 小型固定翼无人机被越来越多地用于军事侦察、物流配送、植保和航空测量等方面。但由于飞行环境日趋复杂, 其飞行控制器极易受到各种扰动的作用, 造成飞行稳定性下降, 导航精度下降, 严重时会发生失控。飞控系统的抗扰动性能是影响其工作性能和工作性能的一个主要因素, 因此, 深入研究其抗干扰性能对于提高其在复杂条件下的存活与工作可靠性有着十分重大的实际价值。

关键词: 小型固定翼无人机; 飞行控制系统; 抗干扰设计

中国民航学会通航分会《2025年中国民用无人机行业发展报告》预计, 到2025年, 国内拥有的小型固定翼无人机数量将超过120万, 年均运行时间有望超过2800万个。这份研究结果还表明, 在最近几年发生的飞机意外事件中, 由于受到电磁干扰和天气条件的影响, 造成飞机失事的比例高达37.5%。在此基础上, 提出了一种基于多源数据的高精度的飞控控制方法, 为提高我国小型无人飞行器在复杂条件下顺利完成任务奠定基础。

一、小型固定翼无人机飞行控制系统面临的主要干扰问题

(一) 复杂电磁干扰与传感器信号失真

在复杂的电磁干扰条件下, 小型固定翼无人机的飞控系统对其敏感部件的电磁兼容性能提出了更高的要求。按照《无人机系统电磁环境适应性测试报告》, 在城市、工业园区等电磁干扰较大的地区, UAV所承受的EMI水平可以达到30-100 V/m, 大大超出了行业规范(GB/T7626.3-2023)《电磁兼容试验和测量技术射频电磁场辐射抗扰度试验》10 V/m的要求。这些强烈的EMI对传感器的作用是通过天线的耦合作用和电缆的导电作用来实现的。三轴MEMS陀螺在2.4 GHz范围内会发生显著的频谐振, 使其角度测得的角度速率发生了较大幅度的变化。在高电压输电线路路上, 磁强仪将产生频率极强的电磁干扰, 其方位角的测量精度可达到15度; 然而, 当遇到脉冲型EMI时, 空气压力计所测得的静压力将产生200 Pa的瞬间跳跃。

(二) 气动环境扰动与飞行姿态失稳

固定翼小型无人驾驶飞机在低高度时所面对的空气动力环境的干扰是由其内部的风剪切及紊流等因素引起

的。中国气象局《低空风场特性观测分析报告(2025)》的统计资料表明, 在距地面100 m处, 地面上的风剪切力分别为0.15 m/s/m和0.08 m/s/m, 而地面100 m处的风剪切力为0.08 m/s/m。在2米展翼和15米/s的飞行速度下, 非均匀的风场将使其左右两侧的速度差异达到3 m/s, 并诱发10 Nm以上的横摇扭矩。对于湍流效应, 冯·卡门的频谱计算结果显示, 在中度紊流情况下, 在0.1-1 Hz频段, 无人飞行器所遭受的干扰角速率谱 $(0.05 \text{ rad/s})^2/\text{Hz}$ 。尤其是在低速巡航状态下, 荷兰滚动模式的阻尼率由0.3降低到0.1, 使得该系统在低速巡航时具有更大的不确定性。

(三) 导航定位偏差与控制系统延时

基于多传感器的小型无人驾驶飞机模型, 在GPS系统中, 由于电离层的延迟、多径效应以及卫星的几何特性, 导致了GPS的精度下降。中国GPS监测中心试验表明, 在城区谷地条件下, 基于GPS编码的GPS编码精度可达15 m (2 DRMS) 和25 m (2 DRMS)。当飞行器处于静止状态时, 其姿态误差将被传输至飞行器的姿态控制环, 使其在静止状态下的姿态维持精度显著降低。尽管目前惯导的短期定位精度很高, 但是随着时间的推移, 它的定位误差会随着时间的积累而不断积累, 其漂移速率一般在0.5 ~ 2米/秒。对于系统延迟, 从传感器数据采集到滤波处理, 再到求解控制器, 再到执行器的反应, 全程有80-150毫秒的时滞。

二、提升飞行控制系统抗干扰能力的有效策略

(一) 构建电磁防护体系与信号滤波机制

建立完备的电磁保护和信号过滤机制是保证小型无人机飞行安全的基本步骤。根据《GB/T 38326-2019民用

《无人机电磁兼容性要求与测量方法》中的有关标准，对无人飞行器进行了电磁干扰测试，并对其在3 V/m范围内的电磁干扰进行了研究。在具体的应用中，要求在硬件层次上设计多层防护，将0.3 mm厚的铜镀层缠绕在飞控芯组件上，并按照GJB 5792-2006规范对其进行封装。该构造可对外界EMI进行40 dB的衰减，对30 MHz到1 GHz频段的干扰信号进行了高效的压制。在实现信号过滤机理时，必须根据UAV的特点，有目的地进行设计。在接收端，提出了一种新的卡尔曼滤波方法，通过对系统的随机噪声特征进行在线估算，从而实现了对系统性能的在线调节。

根据GPS信号的干扰特性，提出了一种基于多波段信号的抗干扰方法。根据《GB/T 39397-2023全球导航卫星系统(GNSS)抗干扰技术规范》的规定，对两个频段(L1)(1575.42 MHz)及L2(1227.60 MHz)进行同步的信号接收，利用载波相位的一致程度对虚假干扰进行鉴别。高精度、低成本、高可靠性的新型惯导定位方法，通过对载噪声、伪距离变化率等参量的综合分析，实现3秒钟左右的高精度定位。基于跳变扩展(FHSS)和直序扩谱(DSSS)是一种新型的通信方式。按照《GJB 2929-97战术通信系统抗干扰性能要求》中的规定，该设备在2.4 GHz频率范围内，以1 MHz/s的频率，对80通道进行频率为1600 MHz/s，并使用32比特的伪码经直接串行扩频。这样的结构可以保证在-10 dB的背景下，在不超过10 dB的情况下，仍然可以实现可靠的通讯，并且可以将错误率降低到10兆贝以内。为提高系统的可靠度，将里德-所罗门(255, 223)的前向纠错(FEC)算法引入到通讯规约层次，实现对16字节差错的自动更正。通过对该装置进行的电磁兼容实验，结果显示，采用以上一体化保护方案的小型固定翼无人飞行器，在符合《GB/T 17626.3-2023电磁兼容试验和测量技术射频电磁场辐射抗扰度试验》的规范要求下，可在10 V/m条件下继续工作，飞行控制系统主要参量的漂移量在15%之内(如表1所示)。

表1 无人机抗干扰系统关键技术指标

技术模块	核心参数指标	性能提升效果
多源导航融合	15维状态向量, GPS失效维持≥30秒	定位误差≤15米, 导航可靠性提升40%
实时控制系统	任务调度100/200/500Hz, Smith预估补偿	控制延时≤12毫秒, 相位滞后改善73%
传感器容错	专家知识库决策, 磁环滤波防护	高度精度±2米, 传感器误码率≤0.01%

(二) 优化气动补偿算法与姿态控制策略

在小型无人驾驶飞机的飞行过程中，空气动力学和姿态的最优匹配是解决该问题的关键技术途径。《小型无人机飞行控制系统技术要求》(GB/T 38996-2020)对其抗风性的规定，在风力为6的情况下，对其进行平稳飞行是必要的。为此，将李雅普诺夫稳定性的思想应用到飞控系统的设计中。通过对飞机实际运行情况和预期运行条件的偏差方程进行在线求解，实现对气动干扰条件下的稳定运行。在实际应用中，需要构建12个状态量的包括位置、速度、姿态和角速度在内的12个系统的非线性动态模型。针对气压补偿方法的研究，提出了一种基于前向-反馈的组合控制方法。前馈控制部分通过对飞行过程中的气象参数进行预测，并在此基础上预先产生舵面转向命令。在应用过程中，采用装在头部左右的五孔空气速度管采集流体的动压、静压和来流角等参数，并在嵌入式平台上进行实时计算。

在对常规PID控制器进行设计时，重点对其进行了改进。提出了一种新的基于双曲率正切的非线性PID控制方法，该方法能够克服大机动时对舵面的“饱和”问题。积分项采用了一种具有自适应性的忽略系数的方法，在姿态偏差保持很大时，可以对积分进行调整，以避免积分饱和现象的发生。在此基础上，利用卡尔曼滤波器对陀螺信号进行预处理，有效地减小了测试噪声对系统性能的干扰。试验结果显示，在突风情况下，采用这种方法可将飞行平台的飞行速度提高40%以上，且飞行姿态超过3°。为了提高对天气变化的适应能力，采用了一种新的深层神经网络模型。在不同风速、风向和大气紊动程度条件下，建立由十万份样本组成的训练集。所建立的神经网络模型，以飞机的飞行速度、迎角、侧偏角和角速率作为输入，作为各个舵面的最佳偏移值。基于增强学习的连续最优模型，并使用近端策略对其进行优化，以实现未知信息的挖掘和使用。通过实测数据验证，该模型在弱下击海流等恶劣天气环境下的控制性能比常规算法提高25%左右。在控制系统的实施层次上，基于异构结构的实时处理方法。采用ARM Cortex-M7作为核心，实现了500 Hz的高精度的位姿求解和基础控制算法；同时，与之相匹配的FPGA加速芯片实现了神经网络的推断，保证了单个正向运算时间不超过2 ms。该系统根据DO-178C航机软件规范设计，每个功能单元都具有各自的监测功能，在发现系统运行状况不正常时，可将备用控制装置转换成以二次调节为基础的备用控制

装置，以保证飞机的安全。

（三）完善导航容错方案与实时控制系统

以联邦卡尔曼滤波器为基础，构建多源信息融合框架，是提高微型固定翼 UAV 导航容错策略的关键。采用惯导（INS）为主要导航系统，通过构建包含 GPS、北斗双模卫星接收机、气压高度计和可视里程计在内的多个自主导航子系统，构成一套具备自主知识产权的多功能冗余导航系统。在此基础上，构建包含位置、速度和姿态等 15 个维度的姿态矢量，利用主滤波和每个本地滤波器之间的相互作用，对最优的导航参数进行估算。在 GPS 被扰动情况下，根据机载相机获取的地表特征点，通过对 GPS 信号的扰动，使其在 30 s 左右的位置误差小于 15 m。针对该问题，提出了一种基于层次结构的作业分配策略。根据《民用无人机飞行控制系统通用要求》（GB/T 38996-2020）中的相关规定，将其分为 3 类，即：1）导航定轨（100 Hz），2）姿态控制（200 Hz），3 个具有显著差异的（500 Hz）。基于 STM32H7 的高性能微处理器，提出了一种基于抢占的实时调度方法^[6]。为了解决时滞问题，将史密斯预估法应用于姿控环节，通过建立准确的伺服机构与伺服机构的动态响应模型，将传统的 45 ms 延迟缩短到 12 ms 以下，从而大幅提高姿控的稳定性。在测量过程中，由于测量值存在跳跃现象，利用两个加速度传感器的二次积累和超声波测量结果进行补偿滤波，使测量结果保持在 ± 2 m 以内。在此基础上，根据 GB/T 43439-2024《无人机电磁兼容性要求与测量方法》（GB/T 43439-2024），采用磁环式滤波器对重要的信号线进行处理，使其误差小于

0.01%。上述各项技术手段为 UAV 在复杂的电磁环境中提供了可靠的工作保证，从而保证了 UAV 在强扰动下的平稳飞行。

结束语

综上所述，开展小型无人机飞行控制的抗干扰研究，对于保证无人机在复杂环境下的飞行安全和提高其工作可靠度有着重要的实际应用价值。进一步提高 UAV 在复杂天气环境下的飞行稳定性能，为拓展 UAV 的工程应用奠定基础。在此基础上，通过对 UAV 的深入研究，使 UAV 的飞行控制具有更强的抗毁性和自修复性。通过该研究，有望在扰动辨识及自主判定等关键问题上取得突破性进展，促进对抗干扰由被动防御走向主动预警和智能躲避，从而达到对复杂环境下的全自主、高可靠智能控制，为我国的低空经济建设和国防建设等领域的发展奠定坚实的基础。

参考文献

- [1] 高晓博. 小型固定翼无人机集群编队快速集结及一致性控制技术[J]. 兵工自动化, 2025, 44(07): 88-93+106.
- [2] 郝云杰, 院老虎. 基于线性自抗扰的固定翼无人机纵向控制[J]. 计算机仿真, 2025, 42(05): 22-26.
- [3] 喻煌超等. 面向机动飞行的固定翼无人机位姿跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(12): 2217-2224.
- [4] 杨爱斌, 陈诚, 夏知胜. 常规布局低速固定翼无人机的参数辨识[J]. 科学技术创新, 2023, (18): 25-29.