

基于 MPC 的四旋翼无人机航迹跟踪控制系统

冯 强¹, 齐 伟²

(1. 西安明德理工学院, 西安 710124; 2. 西安航天动力机械有限公司, 西安 710025)

摘要: 目前研究的四旋翼无人机航迹跟踪控制系统跟踪过程不稳定, 导致跟踪结果不准确; 为此基于 MPC 设计了一种新的四旋翼无人机航迹跟踪控制系统。通过空中飞行控制器、地面控制器和人工干预器实现了无人机航线的跟踪控制; 空中飞行控制器包括 GPS 导航定位模块、姿态评估模块 (MTI)、飞行控制系统计算机, 显示模块等; 地面控制器探测周围飞行环境, 规避障碍物、规划安全航线, 传输至空中自主飞行控制系统, 包括无线通讯的数据连接电路和地面终端控制模块; 人工干预模块能对飞行过程中发生的意外情况进行人工干预以避免突发情况造成危险; 以 VS2010 为开发环境, 利用 C++ 软件设计软件流程; 利用 MPC 多变量控制策略, 以最优动态轨迹为控制目标, 获取无人机的实时飞行状况, 设定航线规划流程, 实行航线动态规划; 实验结果表明, 所设计的无人机航迹跟踪控制系统稳定性较好, 跟踪控制结果与预期的跟踪控制曲线重合度更高, 平均误差控制在 1 cm 以内。

关键词: 模型预测控制; 四旋翼无人机; 航迹跟踪; 跟踪控制; 控制系统

Track Tracking Control System of Quad-rotor UAV Based on MPC

FENG Qiang¹, QI Wei²

(1. Northwestern Polytechnical University Mingde College, Xi'an 710124, China;
2. Xi'an Aerospace Power Machinery Co., Ltd., Xi'an 710025, China)

Abstract: The track tracking control system of the quad-rotor UAV currently studied is unstable, which leads to inaccurate tracking results. For this reason, a new four-rotor UAV track tracking control system is designed based on MPC (model predictive control). Through the air flight controller, the ground controller and the manual intervention device, the tracking control of the UAV route is realized. The air flight controller includes GPS navigation and positioning module, attitude evaluation module (MTI), flight control system computer, display module, etc. The ground controller detects the surrounding flight environment, avoids obstacles, plans a safe route, and transmits it to the air autonomous flight control system, including wireless communication data connection circuits and ground terminal control modules. The manual intervention module can manually intervene in unexpected situations during the flight to avoid danger caused by emergencies. Take VS2010 as the development environment and use C++ software to design the software process. Using the MPC multi-variable control strategy, taking the optimal dynamic trajectory as the control target, obtaining the real-time flight status of the UAV, setting the route planning process, and implementing the route dynamic planning. The experimental results show that the designed UAV trajectory tracking control system has better stability, the tracking control result has a higher degree of coincidence with the expected tracking control curve, and the average error is controlled within 1 cm.

Keywords: MPC (model predictive control); quad-rotor unmanned aerial vehicle; track tracking; tracking control; control system

0 引言

近年来无人机的应用越来越广泛, 因其独特的体积小、隐蔽性强、飞行稳定等优点, 在军事及民用领域都发挥着极其重要的作用, 尤其在抢险救灾及影视行业中都扮演了十分重要的角色^[1-2]。四旋翼无人机系统不同于普通无人机, 采用非线性系统, 另因其特殊的驱动也对无人机的航迹跟踪控制带来了困难^[3-4]。

无人机的飞行环境复杂, 这些问题都对四旋翼无人机的控制提出了很高的要求, 控制系统会直接影响四旋翼无人机的飞行状态和任务执行的优势性。为了更好的实现四

旋翼无人机的航迹跟踪和控制, 本文基于 MPC 航迹规划算法和航迹跟踪算法对硬件和软件部分进行设计, 通过数据通讯实现地面控制与空中飞行控制的数据交换, 提出了一种基于 MPC 控制的四旋翼无人机跟踪控制系统, 并通过实验验证了该控制系统的有效性。

1 四旋翼无人机航迹跟踪控制系统硬件结构设计

根据四旋翼无人机的飞行荷载有限的特点, 通过空中和地面两个部分实现控制系统的设计, 结构如图 1 所示。

根据图 1 可知, 根据不同的任务需求, 无人机航迹跟踪控制系统分为 3 个部分: 空中飞行自主控制模块、地面

收稿日期: 2021-04-25; 修回日期: 2021-05-24。

基金项目: 陕西省教育厅专项科研项目(17JK1141)。

作者简介: 冯 强(1976-), 男, 陕西蓝田人, 硕士, 副教授, 主要从事工业设计、服务设计方向的研究。

引用格式: 冯 强, 齐 伟. 基于 MPC 的四旋翼无人机航迹跟踪控制系统[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(8): 109-113.

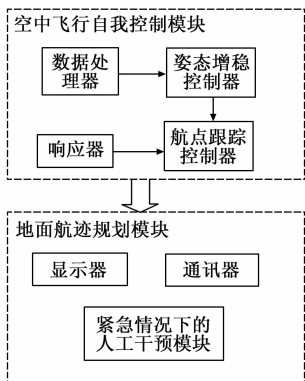


图 1 基于 MPC 的四旋翼无人机航迹跟踪控制系统硬件结构

航迹规划系统、紧急情况下的干预模块，空中控制器主要负责稳态飞行和航迹跟踪控制，地面控制器主要负责飞行的动态航线规划，并通过无线通信技术将两部分结果进行数据连接，该控制系统中，地面控制决定了无人机的航迹规划，要求系统能够对周围环境进行甄别并有效规避障碍物^[5-6]。空中控制则要求能够准确执行地面控制系统所规划的航线。

1.1 四旋翼无人机平台设计

四旋翼无人机平台主要硬件包括：飞行器、电机、螺旋桨。为避免在调试过程中因摔机造成机架损坏，选用主体采用模块化设计、便于拆卸和更换的 F450 机架。为了要最大限度的提升无人机的系统性能，要合理搭配电机和螺旋桨，电机在选择上主要考虑无人机的最大飞行荷载，电机自重应小于电机最大动力的 2/5。螺旋桨的选择主要考虑电机的电压值，一般电压值较大时优先选择小型螺旋桨；当电压值较小时，优先选用大型螺旋桨。本文设计使用 4 s 电池，电压为 22 V，搭配 APC1540 螺旋桨^[7-8]。

1.2 飞行控制器设计

飞行控制器的主控计算机是整个系统的核心，要负责传感器数据的采集与分析、自主飞行控制算法的计算、输出指令和其他模块间无线数据传输，因此，主控计算机应具有强大的计算能力，多个通信接口，较低的功耗，合适的重量和体积。因此本文采用法国 ST 公司 STM32F4 系列芯片主板，如图 2 所示。

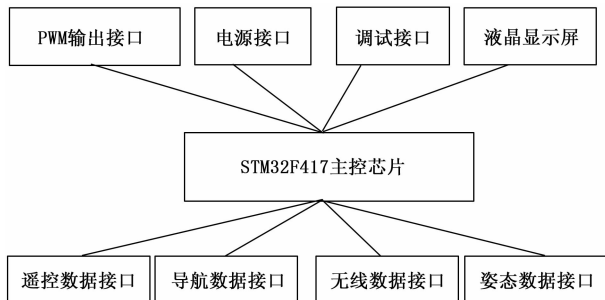


图 2 STM32F4 系列芯片主板

该主板的芯片内核处理器为 Cortex-M4，辅以运算单元 FPU，主要频率为 169 MHz^[9-10]。根据图 2 可知，该芯

片连接 PWM 输出接口，电源接口及调试接口，保证 STM32F4 系列芯片主板的稳定运行，通过遥控数据接口实现飞控数据的接收机传输；通过导航数据接口及无线数据接口实现飞控数据的处理，通过姿态数据接口实现无人机姿态控制数据的传输，并在芯片连接的液晶显示屏上展示。

1.3 导航控制器设计

导航控制器主流的 GPC 定位系统精度不够，存在很大的误差，无法满足四旋翼无人机的导航要求，所以本文基于借助 Ublox 6H GPS 定位技术，采用 MS5803 数字式高度计来实现导航定位。

本文设计的导航控制器如图 3 所示。

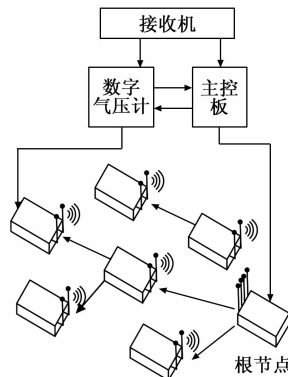


图 3 导航控制器

图 3 为导航控制器结构图，接收机接收四旋翼无人机航迹数据，通过数字气压计及主控板实现外界大气压力，温度，湿度和海拔高度的测量，通过 Ublox 6H GPS 定位技术实现导航定位。

1.4 姿态指引仪

姿态指引仪包括陀螺仪、加速度计和磁力计。加速度计的主要功能是通过测量重力加速度^[11-12]来校正陀螺仪的俯仰和横滚角，输出三轴加速度和角速度，然后将其反馈到控制系统作为对照参考。磁力计用于测量地磁场的漂移以校正偏航角^[13]。本位采用 MTI 姿态参考系统设计姿态指引仪，参考仪内部分别集成三轴加速度计、轴磁力计、角速率陀螺和温度传感器。采用卡尔曼滤波算法得到姿态估计参数，分辨率为 0.1，数据更新频率为 256 Hz，俯仰角输出范围为 ±90°，角速度输出角度 ±300°，通信波特率 921 700 bps。

1.5 数据通信器

数据通信器为地面控制系统和空中控制系统间的数据交换纽带，本文采用 MaxStream 公司的 9XTend OEMRF 模块，通信距离最远可大 70 km，采用 5 V 的串行接口，天线接口采用 RPSMA，植入抗干扰技术，避免无线电干扰，灵敏度 110 dBm，工作频率为 900 MHz，数据处理量为 240 Kbps。

1.6 人工干预器

地面控制模块的主要任务是规划航线，本文设计采用高配置终端计算机。当无人机发生突发意外情况时，可以

切换到人工遥控模式, 人工干预主要通过 FUTABA T8FG 遥控器和 RS5803SB 接收器实现, FUTABA 遥控器和接收器采用 SBus 传输协议, 该协议遵循串口数据流传输模式的基本数据流协议, 以 100 bps 的频率对数据单元进行发送。根据 Sbus 协议的数据单元进行有效传输, 每次有效传输的数据包括 25 个字节, 且以低速高速交替形式进行周期性传输。Futaba T8FG 遥控器每个指令占用 11 位的空间传输空间, 总共包含了 16 通道的控制指令。

2 基于 MPC 的四旋翼无人机航迹跟踪控制系统软件设计

本文软件本设计系统中, 地面控制中心的航线规划系统是基于 windows 系统的 PC 计算机开发的, 自主航线跟踪控制系统是基于 STM32 微处理器进行裸机开发。提供了完善的 C++ 语言, C++ 语言库函数进行应用层软件的开发和调试, 极大地降低了程序的开发难度。航迹跟踪控制中心采用基于芯片 STM32F417 的裸机开发, 无操作系统, 在 IAR Embedded Workbench for ARMv6.4 集成开发环境下进行裸机开发, 在该环境下 ST 公司开发了不同类型芯片的操作库文件, 这样极大地降低了应用程序开发的难度^[14-15]。

MPC 是一种进阶过程控制方法, 这是一种多变量控制策略, 以最优动态轨迹为控制目标, 设定航线规划软件流程如图 4 所示。

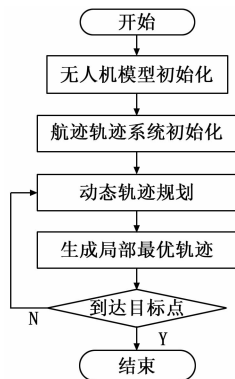


图 4 航线规划软件流程

观察图 4 可知, 采用空间质点模型来实现飞行控制系统的航线规划, 根据三维方向上的速度变化率得出其动态性能约束。通过网络云端数据获取障碍物数据信息, 建立航线规划系统环境模型, 利用鼠标在地图上标记目标地点, 从地面网站获取目标地点位置, 规划到系统目录下生成文本文档。在规划航线时, 通过读取地面共享信息得出具体障碍物数据信息, 对障碍物空间进行规划, 利用无线数据传输获取无人机的实时飞行状况, 实行航线动态规划^[16-18]。

对航线规划问题建模, 采用 MPC 控制方法, 以 AMPL 标准模型语言对多目标优化问题描述, 然后调用 CPLEX 软件对目标函数求解, 同时忽略滚动时域, 把第一个点作为飞行目标点, 求出 N 个时域的最优解航线, 具体流程如图 5 所示。

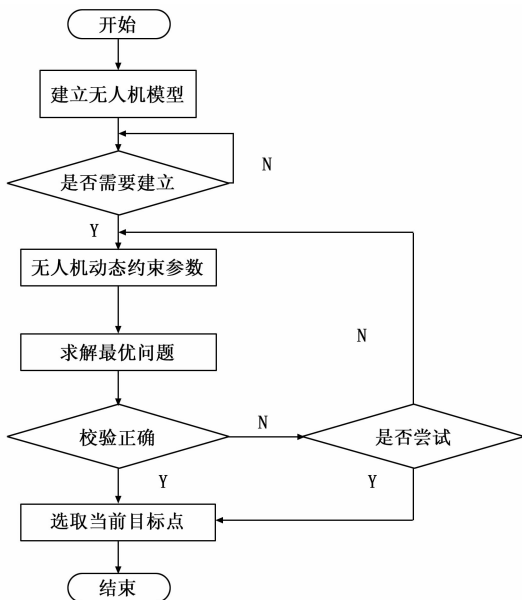


图 5 最优解航线流程

接口数据接收程序接收的数据主要有: MTI 姿态系统数据、GPS 导航系统数据、无线链路数据、遥控器控制数据。其中 MTI 数据, GPS 数据和无线链路数据是通过硬件接口开进行数据交互的, 遥控数据为 Futaba 配套的特殊 SBU_s 通信协议, 通过接口改进, 可以转换为一般的通信协议。在数据传输中, MTI 姿态数据和遥控器数据格式大体相同, 每次传输的数据包中包含一前端数字, N 个字节的传输数据集和末端的数据验证。

高度计采集板上的导航定位信息是处理过的, 可以实现输出数据的格式调节, 因此所有的数据接收程序都接口中断用于触发 MDA 数据接收, 以完成中断形式。当缓冲区中有要访问的数据时, 触发 USART 接收, 检测到数据包前端数位后, 关闭 USART 数据接收通道, 触发 DMA 直接接收 N 个字节的数, DMA 接收完成触发中断打开 USART 数据接收通道^[19-20]。

通信数据链设计采用 XTend OEMRF 模块, 考虑到无人机的飞行环境复杂多变, 所以该通信模块设计为拓扑结构, 地面 Base 随时掌握飞机的状态信息, 包括经纬位置, 速度和飞行姿态等等。地面控制站能够将规划航线控制指令上传到无人机, Remote 根据根据接受的指令信息作出反应, 实现 Base 和 Remote 间的数据交互, 无人机根据指令执行飞行航线。考虑到信息传输过程中会出现数据错误和丢失的情况, 在通行模式中设置 base 和 Remote 的应答机制, 准确可靠地实现地面站与空中多飞行器的数据间通信。

3 实验结果与分析

为了验证本文提出的基于 MPC 的四旋翼无人机航迹跟踪控制系统的有效性, 设计对比实验, 选用本文提出的跟踪控制系统与传统的基于云台相机的四旋翼无人机航迹跟踪控制系统, 基于数据挖掘的的四旋翼无人机航迹跟踪控

制系统进行实验对比。设计实验参数如表 1 所示。

表 1 实验参数

项目	参数
无人机总质量/kg	4.258
沿着 x 方向的转动惯量/(kg/m ²)	0.024 12
沿着 y 方向的转动惯量/(kg/m ²)	0.020 58
沿着 z 方向的转动惯量/(kg/m ²)	0.021 45
工作电压/V	120

根据上述实验参数，选用本文基于 MPC 的四旋翼无人机航迹跟踪控制系统和基于云台相机的四旋翼无人机航迹跟踪控制系统、基于数据挖掘的四旋翼无人机航迹跟踪控制系统进行实验。

预计的跟踪控制结果如图 6 所示。

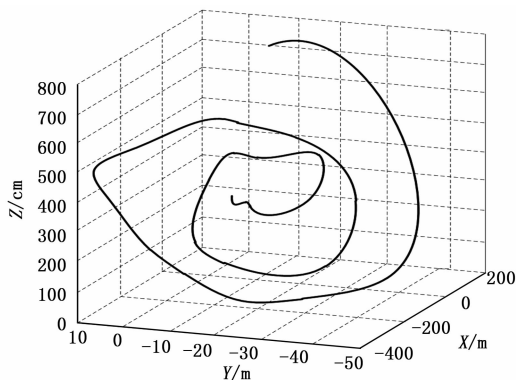


图 6 预计的跟踪控制曲线

利用下式求解不同无人机航迹跟踪控制系统的跟踪结果：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， M 为四旋翼无人机航迹跟踪坐标， X 、 Y 、 Z 分别为横纵坐标及垂直坐标的预计位移值，通过上式求解航迹跟踪控制结果。

基于云台相机的四旋翼无人机航迹跟踪控制系统得到的跟踪控制结果如图 7 所示。

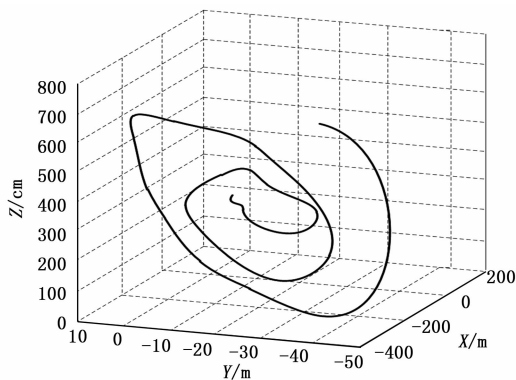


图 7 基于云台相机的四旋翼无人机航迹跟踪控制结果

基于数据挖掘的四旋翼无人机航迹跟踪控制系统得到的跟踪控制结果如图 8 所示。

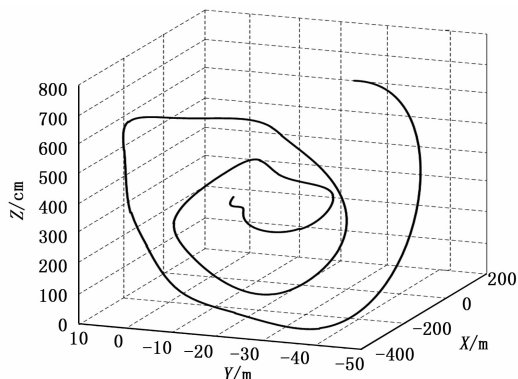


图 8 基于数据挖掘的四旋翼无人机航迹跟踪控制结果

本文提出的基于 MPC 的四旋翼无人机航迹跟踪控制系统得到的跟踪控制结果如图 9 所示。

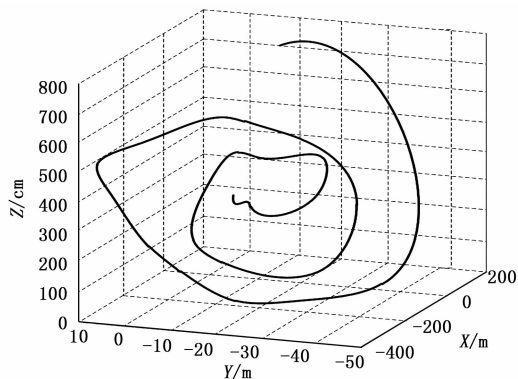


图 9 基于 MPC 的四旋翼无人机航迹跟踪控制系统得到的跟踪控制结果

根据上述实验结果可知，本文基于 MPC 的四旋翼无人机航迹跟踪控制系统得到的跟踪控制结果与预期的跟踪控制曲线重合度更高，平均误差控制在 1 cm 以内。本文提出的控制系统具有颜色特征识别功能，MPC 在跟踪控制过程中，会随着目标的移动而移动，对于无人机旋转角度有很好的跟踪能力，视线范围之内始终跟着跟踪目标。

综上所述，基于 MPC 的四旋翼无人机航迹跟踪控制系统具有很好的控制能力，可以在地面和空中实现对无人机精确稳定的跟踪控制。

4 结束语

本文根据综合控制系统的需求出发，设计了四旋翼无人机航线跟踪控制的硬件平台，然后基于 MPC 航迹规划算法和航迹跟踪算法对软件部分进行设计，最后通过数据通讯模块实现了无人机和地面控制系统间的数据通信，完成整个基于 MPC 的四旋翼航线跟踪控制系统。本文虽然基于 MPC 针对无人机航迹跟踪和控制提出了系统的方法，但还存在很大的改善空间，特别是对于姿态控制的分析中，弱

化了各通道间的耦合, 姿态动力学模型简化为线性化小扰动模型。在实际情况下, 小型四旋翼无人机的飞行路径控制效果尚不理想。所以对航迹的控制研究将是今后的工作重点, 对于小型旋翼飞行器来说能够自主避障的控制系统是未来发展的必然趋势, 希望在未来的研究中能更好的实现对四旋翼无人机的航迹跟踪和控制。

参考文献:

- [1] 王晓海, 孟秀云, 李传旭. 基于 MPC 的无人机航迹跟踪控制器设计 [J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43 (1): 197-204.
- [2] 王 彪, 唐超颖, 姚振楠. 基于串级 LADRC 设计的旋翼无人机航迹跟踪控制 [J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41 (6): 191-198.
- [3] 王春阳, 姜明瑞, 史红伟. 四旋翼无人机航迹跟踪控制系统设计 [J]. 电光与控制, 2019, 26 (3): 107-111.
- [4] 徐一鸣, 李 笑, 杨凯凯, 等. 基于深度学习的四旋翼无人机控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (5): 129-133, 161.
- [5] 郑世钰, 艾晓琳, 杨 迪, 等. 基于积分反步法的四旋翼滑模轨迹跟踪算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41 (3): 643-650.
- [6] 张 勇, 陈增强, 张兴会, 等. 基于自抗扰的四旋翼无人机动态面姿态控制 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2019, 49 (2): 562-569.
- [7] 唐舒放, 王志胜, 张 舵. 基于光流定位的四旋翼飞行器技术研究 [J]. 机械与电子, 2019, 37 (7): 56-59, 65.
- [8] 余小燕, 孙宛坤, 熊玉洁, 等. 基于改进 ADRC 的四旋翼无人机抗干扰姿态控制系统设计 [J]. 电光与控制, 2020, 27 (12): 82-87.

(上接第 108 页)

了分布式仿真平台与组态监控平台的数据接口, 建立了主起落架收放系统组态监控原理图, 充分利用 DDS 数据分发服务的实时性、高效性以及组态监控平台良好的图形界面, 大幅缩短监控界面设计周期, 实现对仿真平台上由不同专业仿真软件建立的 28 个飞机机电系统子模型中 1 647 个模型端口变量的组态化显示与运行控制, 直观显示各个系统模型的状态变化, 改变了以往只能在指定仿真节点的仿真软件中以单一方式进行参数查看与调整, 有利于用户更好的理解飞机机电系统、调配系统性能参数、优化系统集成与扩展等, 提高了飞机机电系统的集成测试效率与操作便捷性。

参考文献:

- [1] 张栋善, 谭 涛. 基于多电飞机概念下的飞机电气发展方向 [J]. 电子测试, 2018 (6): 125, 124.
- [2] 刘 巍, 黄智勇. 国产化实时通信中间件 DDS 的跨平台实现和优化技术 [J]. 现代雷达, 2019, 41 (7): 39-43.
- [3] 郑鹏怡, 张振国, 袁战军. 基于发布订阅机制的实时中间件的

- [9] 陶少俊, 薛文涛, 杨晓飞. 基于组合滑模的升力受限四旋翼航迹跟踪 [J]. 控制工程, 2020, 27 (11): 59-66.
- [10] 张建中, 刘海洋, 胡化增, 等. 基于扩张状态观测器的四旋翼无人机航迹跟踪控制 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (31): 380-385.
- [11] 李俊芳, 李 峰, 吉月辉, 等. 四旋翼无人机航迹稳定跟踪控制 [J]. 控制与决策, 2020, 35 (2): 96-103.
- [12] 罗鼎馨, 蒋 近, 许迪文. 四旋翼载重无人机双闭环航迹跟踪控制 [J]. 微特电机, 2020, 48 (9): 43-48.
- [13] 张文清, 徐雪松, 刘 瑞. 基于反馈线性化的四旋翼无人机姿态控制研究 [J]. 计算机仿真, 2019, 36 (1): 94-98.
- [14] 王术波, 韩 宇, 陈 建, 等. 基于 ADRC 迭代学习控制的四旋翼无人机姿态控制 [J]. 航空学报, 2020, 41 (12): 319-331.
- [15] 童颖裔, 董文瀚, 贺 磊, 等. 四旋翼无人机预设性能反步航迹跟踪控制 [J]. 飞行力学, 2020, 38 (6): 45-51.
- [16] OTTE M, KUHLMAN M J, SOFGE D. Auctions for multi-robot task allocation in communication limited environments [J]. Autonomous Robots, 2020, 44 (6): 1-38.
- [17] 石喜玲, 孙运强, 李 静, 等. 四旋翼动力学建模及非线性 PID 航迹跟踪控制 [J]. 科学技术与工程, 2020 (6): 2489-2493.
- [18] 王 东, 范叶满, 薛金儒, 等. 基于 GNSS 与视觉融合的山地果园无人机航迹控制 [J]. 农业机械学报, 2019, 50 (4): 20-28.
- [19] 陶少俊, 薛文涛, 杨晓飞. 基于组合滑模的升力受限四旋翼航迹跟踪 [J]. 控制工程, 2020, 27 (11): 59-66.
- [20] 汤 亮, 卢文政, 龚发云, 等. 基于风扰观测的四旋翼无人机双幕次滑模控制 [J]. 飞行力学, 2019, 37 (6): 30-36.

- [1] 设计与实现 [J]. 计算机应用与软件, 2018, 35 (1): 44-47.
- [4] 邹 歌, 刘云飞. 实时数据分发服务的自动发现技术 [J]. 计算机技术与发展, 2017, 27 (1): 25-29.
- [5] 张丽哗, 褚厚斌, 蔡斐华, 等. 基于复杂参数的组态化显示监控系统 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (4): 85-87.
- [6] 刘学多, 焦东来, 吉 峰, 等. 面向中间件的组态王远程数据采集驱动设计 [J]. 计算机应用, 2016, 36 (1): 96-100.
- [7] 蒋慧军, 王雪梅, 陈昊明. 组态软件在导弹测控系统中的应用研究 [J]. 微计算机信息, 2009, 25 (22): 245-246.
- [8] 杨占才. 可视化组态软件设计及其在新型支线客机中的应用 [J]. 测控技术, 2008, 27 (s): 16-19.
- [9] KANG W, KAPITANOVA K, SON S H. RDDS: A real-time data distribution service for cyber-physical systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8 (2): 393-405.
- [10] 山 寿, 郝明哲, 孙 伟. 基于数据分发服务和 WPF 技术的试飞实时监控系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (3): 119-122.
- [11] Form ++ MFC Library 技术白皮书 [R]. USA: UCan-CodeSoftware, 2002.