

雷达监测协同飞行器列阵飞行控制系统设计

王盘龙, 嵇启春

(西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 西安 710000)

摘要: 当前飞行器列阵飞行控制技术中单机间相对位置不易确定, 造成列阵飞行状态监测和姿态感知较难, 存在控制准确度低、可靠性差的问题; 据此, 设计一种基于改进降噪目标提取算法的地面站可见光监测控制系统; 通过对列阵中各单机飞行状态的图像监测, 确定位置与姿态, 以及其在列阵中的位置偏差, 给出实时动态调整指令; 设计的改进型降噪目标提取算法, 降低了复杂背景噪声对飞行器目标提取的影响, 提高了监测准确性; 该系统将飞行状态监测和姿态感知功能设置于地面站中, 极大减少了对飞机的载荷依赖, 实现对飞行器列阵飞行的智能管理和任务规划; 经实验验证, 该智能控制系统的偏差率维持在 2% 以下, 结果表明本智能控制系统能够准确、可靠的控制 50 架飞行器列阵的静态和动态行动。

关键词: 雷达监测; 飞行器; 列阵飞行; 智能控制

Design of Radar Monitoring Cooperative Aircraft Array Flight Control System

Wang Panlong, Ji Qichun

(School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology,
Xi'an 710000, China)

Abstract: In the current aircraft array flight control technology, the relative position between individual aircraft is not easy to determine, which makes array flight status monitoring and attitude perception difficult, and has the problems of low control accuracy and poor reliability. Based on this, a visible light monitoring control system for ground stations based on an improved noise reduction target extraction algorithm is designed. Based on the image monitoring of the flight status of each single aircraft in the array, determine the position and attitude, as well as its position deviation in the array, and give real-time dynamic adjustment instructions; an improved noise reduction target extraction algorithm designed to reduce complex background noise effect on the target extraction of the aircraft improves the monitoring accuracy. The system sets the flight status monitoring and attitude sensing functions in the ground station, which greatly reduces the load dependence on the aircraft, and realizes intelligent management and mission planning of aircraft array flight. The experimental verification shows that the deviation rate of the intelligent control system is maintained below 2%. The results show that the intelligent control system can accurately and reliably control the static and dynamic actions of the 50 aircraft arrays.

Keywords: radar monitoring; aircraft; array flight; intelligent control

0 引言

飞行器问世以来, 以其安全、灵活、轻量化、性价比高等诸多优点成为航空工业发展的重点方向。但是由于受起飞重量、留空时间、电源控制的制约, 单架飞行器可挂载的有效载荷十分有限, 造成功能单一的窘迫难题, 严重限制了飞行器的应用。飞行器列阵飞行模式可以有效解决这一问题, 但列阵飞行过程中姿态与相对位置较难控制^[1]。

文献 [2] 采用仿生蜂群的“主-从”体系架构, 在列阵中设置一架指挥机, 由其控制其他列阵成员, 但是复杂的机间通讯系统和庞大的功耗制约了其向实用化转变。文献 [3] 采用地面控制的技术体制, 多个地面控制站分别遥控一架飞行器, 人为完成飞行器列阵, 虽然实现了列阵飞

行演示, 但是地面控制设备过于庞大, 导致成本居高不下, 同样限制了其应用。

为了以最简化的系统实现多飞行器列阵飞行的控制难题, 提出一种采用地面站视频监测飞行器状态的方法^[4-5], 将复杂的机间协同设置在地面站执行, 列阵中各飞行器的飞行状态、姿态信息以及控制指令都由地面站发出, 大幅度地减少了飞行器上为列阵飞行配备的硬件设备, 为有效任务载荷留出空间; 设计了改进型降噪目标提取算法, 改善了飞行器目标在视频图像中的信噪比, 降低了对光学成像设备的要求, 控制了成本。以简化、实用的系统组成, 低成本实现智能化飞行器列阵控制的目的。

1 基于雷达监测的飞行器列阵飞行智能控制系统设计

1.1 系统总体设计

出于对飞行器列阵飞行中飞机定位与姿态调整等关键技术的考虑, 基于雷达监测的飞行器列阵飞行智能控制系统侧重于解决对飞行器空间位置的监测和列阵队形的智能控制问题。系统由雷达监测子系统、飞行器位置与姿态感

收稿日期: 2020-03-05; 修回日期: 2020-04-03。

作者简介: 王盘龙(1993-), 男, 安徽亳州人, 硕士生在读, 主要从事 MEMS 陀螺仪检测方向的研究。

嵇启春(1963-), 女, 陕西西安人, 博士, 教授, 主要从事自动化、控制等方向的研究。

知子系统以及飞行器列阵航路控制子系统组成。系统组成框图见图 1。

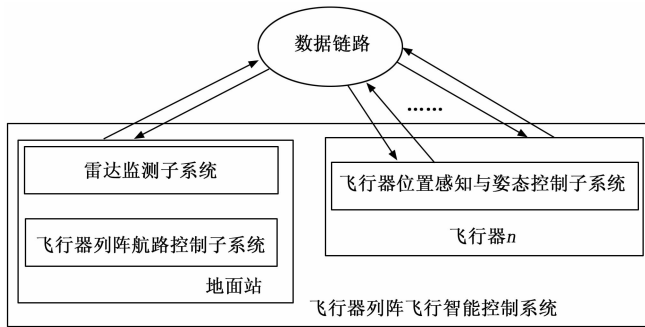


图 1 基于雷达监测的飞行器列阵飞行智能控制系统组成框图

雷达监测子系统位于地面站，完成对飞行器位置的监视及飞行器间相对位置的测量，实现对飞行器的位置锁定与控制姿态检查功能；飞行器列阵航路控制子系统设置于地面站控制主机中，完成对列阵中各个飞行器的航路规划，生成对每一架飞行器的姿态调整命令，实现对列阵队形的控制；飞行器位置与姿态感知子系统为分布式架构，位于每一架飞行器上，完成对载机的空间定位与姿态感知。在数据链路组成的命令与数据传输平台中，飞行器位置与姿态感知子系统能够完成自身状态的上报，雷达监测子系统实现对每一架飞行器的控制。

1.2 雷达监测子系统设计

1.2.1 雷达监测子系统硬件设计

飞行器位置定位方法主要有雷达法和图像法，雷达法采用探测雷达波回波的技术实现对飞行器的定位与跟踪；图像法采用可见光或红外摄像机采集飞行器画面，通过目标识别与跟踪，实现对飞行器的监测^[6]。本文采用雷达法和图像法共同完成对飞行器监测系统的设计。

雷达监测子系统由视频采集模块、通信模块、解码模块、图像存储模块、算法处理模块以及云台控制模块组成。

视频采集模块是飞行器列阵飞行智能控制系统的光学前端，选用海康威视 DS-2DF73301W 型摄像机，实现可见光视频图像的采集功能^[7]。该型摄像机采用 1/2.8" CMOS 光电转换器件，最大分辨率 2 048 × 1 536，帧频 25 fps，镜头焦距 4.5~135 mm，视场角 58.9~2.11° 连续可调，可以满足 5 km 距离内对飞行器的探测与监视需求。

通信模块采用网络交换机和以太网完成摄像机与计算机连通，保证两者之间监控画面和控制指令的实时通信。

解码模块内置于计算机中，实现视频码流解码，并将图像转换为 RGB 格式，存入图像存储模块待处理。

图像存储模块作为图像缓存中心，将解码模块送来的视频码流超低延时存储，并能够快速读取，供算法读取解算。

算法处理模块是图像采集的处理核心，负责将视频流中的图像根据预设规则提取并确认，输出脱靶量给云台控

制机模块，同时向计算机发送跟踪结果。

云台控制模块是摄像机的载体控制器，控制云台转动，实现目标中和摄像机光轴中心调整。

以上各模块形成一个视频采集输入——处理——识别——跟踪的目标发现流程，能够对列阵中各个飞行器的空间位置和姿态信息进行采集。为了提高飞行器的识别概率和跟踪精度，需要在算法处理模块中根据飞行器的物理特征、灰度值特征、运动特征加以综合，剔除背景的虚假目标。处理流程见图 2。

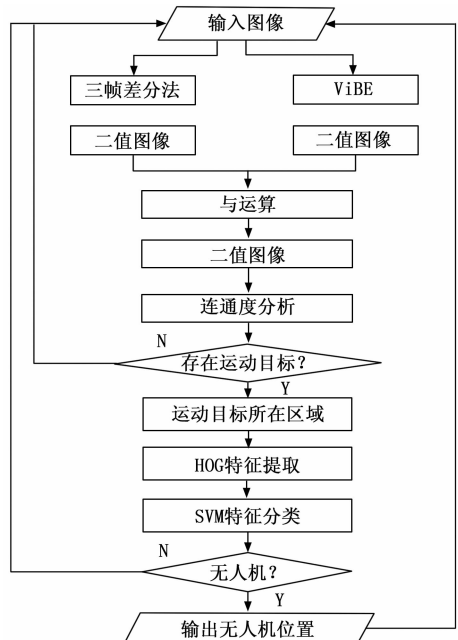


图 2 地面站飞行器监测流程图

摄像机码流的帧频为 25 fps，而系统算法的设计处理速度为 10 020 帧/s，如果对解码获得的每一帧图像都进行串行处理，会导致运算量巨大，数据堆积，造成延时，影响系统的跟踪精度。且该问题会随着程序运行时间的延长形成累积效应，引发“死机”^[8]。为解决这一问题，系统设计为多线程实时处理模式，在 FPGA 中以硬件语言构建处理线程。第一个线程，负责视频解码并将结果存入 COAST；采用算法跟踪检测在存储模块中调用的第二个线程。通过设置模块定位目标。为防止线程间数据混淆，并提高算法功能，故不设置数据交互模块。课题所设计系统中，不同的线程对数据的处理速度是不同的，故此需要采用丢帧法解决链队列图像存储结构中，由于线程速率不同产生的图像信息错误问题。丢帧法是在检测出链队列图像数据错误时，不处理该问题图像，直接继续处理下一帧图像的一种容错处理方法。采用丢帧法可以保证监控数据的实时性，防止系统对图像数据纠错而产生数据监控延时问题。

1.2.2 雷达监测子系统程序设计

为提高飞行器目标检测速度，满足系统实时性需求，本文采用改进型目标提取算法。算法的核心是对图像处理领域广泛使用的经典非线性各向异性扩散方程（P-M 模

型) 进行改进, 优化目标图像的边缘, 提高目标与背景的分界特征。

P-M 模型可以概括为两个扩散系数函数:

$$f(|\nabla u|) = \frac{1}{1 + (|\nabla u|/k)^2} \quad (1)$$

$$f(|\nabla u|) = \exp\left[-\left(\frac{|\nabla u|}{k}\right)^2\right] \quad (2)$$

式中, ∇u 为梯度模, k 为边缘阈值, $f(|\nabla u|)$ 表示扩散的强度, 在边缘区域扩散力度小。

经过坐标变换后, 可将 P-M 模型简化为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = [f(|\nabla u|) + f'(|\nabla u|)|\nabla u|]u_{\eta} + f(|\nabla u|)u_{\xi} \quad (3)$$

u_{η} 和 u_{ξ} 代表 u 在切线方向 η 与梯度方向 ξ 上的二阶导数。

为降低边缘区域的扩散性, 对 P-M 模型加以改进, 力求在边缘区域的 $f(x)$ 趋于 0, 函数只沿着切线方向扩散, 构建改进型目标提取算法:

$$f(x) = \frac{1}{2 \times \ln\left[e + \left(\frac{x}{k}\right)^2\right]} \quad (4)$$

其中: k 为一个设定值。当自变量为 0 时, 函数值为 0.5, 切线和梯度方向具有相同的扩散; 随着自变量增大, 函数值减小, 直至趋近于 0, 即只沿着切线扩散, 满足各向异性扩散要求。

具体流程为: 首先使用三帧差分法去除鬼影现象, 检测运动目标的轨迹特征; 在检测到运动目标之后, 根据目标大小设置自适应波门, 划定运动目标所在区域, 对该区域使用改进型目标提取算法进行识别^[9]。由于这样处理后, 极大地缩小了需处理图像的数据量, 相应地也减少了算法的计算量, 能够满足系统的实时性需求。

由于改进算法提取的目标自适应波门并不一定能将飞行器目标完全精确地圈定, 而可能只圈定了目标的一部分, 因此需要对波门进行中心放大, 保持波门的中心位置不变, 根据检测到的飞行器图像面积信息按比例放大波门的长和宽, 再在放大后飞行器图像中进行检测。

检测结果储存在类 Rect 中, Rect 包含 4 个参数 x 、 y 、 w 和 h , 分别指波门的左上角坐标 (x, y) 以及波门的宽 w 和高 h , Rect 进行自适应调整的公式如式 (5) 所示, 式中, m 为自适应调整 Rect 参数, x_0 、 y_0 、 w_0 、 h_0 为原 Rect 参数, 放大 2 倍。为应对飞行器目标超出波门界限问题以及目标恰在图像边缘区形成超界, 需要对检测结果进一步计算, 实现根据目标图像大小自适应设定波门框大小的功能, 参见公式 (6), 将检测结果与原图对应的类 Rect $(0, 0, 2048, 1536)$ 求交集, 计算波门大小^[10]。式中, x 、 y 、 w 、 h 为最终结果参数。

$$\begin{aligned} \text{Rect}(x_1, y_1, w_1, h_1) &= \text{Rect}(x_0 - m * w_0 / 2, \\ & y_0 - m * h_0 / 2, m * w_0, m * h_0) \\ \text{Rect}(x, y, w, h) &= \text{Rect}(x_1, y_1, w_1, h_1) \& \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{Rect}(0, 0, 2048, 1536) \quad (6)$$

在飞行器阵列距离摄像机约 480 m 情况下, 摄像机放大倍数选取为 30 倍, 单架飞行器在画面中的分辨率计算大小约为 24×12 , 此情况下飞行器监测的处理速度约为 5.71 fps, 对阵列中有效区分距离为 0.5 m, 满足飞行器阵列飞行中的安全距离设定值, 因此雷达监测子系统能够实现飞行器阵列精密监控的功能需求。雷达监测子系统流程如图 3 所示。

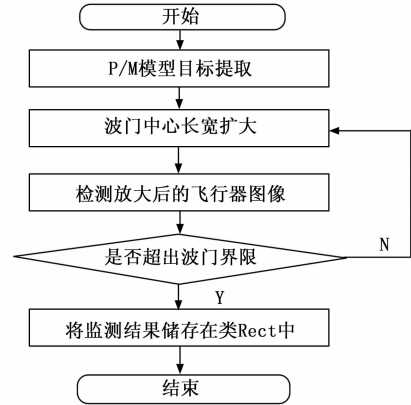


图 3 雷达监测子系统流程图

1.3 飞行器位置与姿态感知子系统设计

1.3.1 飞行器位置与姿态感知子系统硬件设计

根据雷达监测子系统完成对飞行器阵列的空间定位监控, 飞行器位置与姿态感知子系统完成单架飞行器自身定位测量和姿态感知功能, 实现机上数据与地面数据的相互印证与支持, 并为阵列中飞行器间距提供准确数据。

飞行器的姿态解算需要对陀螺仪、加速度计、磁力计 3 个传感器的信息综合解算。由于传感器的灵敏度高易受噪声干扰特点, 为提高姿态测量的精度, 采用数字滤波方法对传感器原始数据加以处理, 经过数据融合、姿态解算等处理后, 计算出飞行器的俯仰角、横滚角、偏航角三轴姿态数据^[11]。本文中飞行器的陀螺仪和加速度计选用的是集成的六轴传感器 MPU6050, 磁力计选用的 HMC5883L 芯片, 传感器均采用 IIC 总线与飞控通信互联。

1.3.2 飞行器位置与姿态感知子系统程序设计

考虑到陀螺仪工作的实时性要求以及噪声干扰源主要为机上电机转动带来的高频振荡, 因此选择了低通滤波。

低通滤波的原理为: 将每一次的输出值与上一次的输出值建立关联, 减缓信号的跳变, 起到平滑信号的作用^[12]。低通滤波算法如式 (7) 所示:

$$y(n) = ay(n-1) + (1-a)y(n) \quad (7)$$

式中, a 为滤波系数。通过调节 a 来平衡灵敏度和平稳度, a 的值越小, 表示对信号跳变的限定越严格, 得到滤波器输出越平稳, 但同时灵敏度会越低; 相反, a 的值越大, 对信号跳变的限定能力越差, 输出变得不稳定, 但电路灵敏度会变高。合理选取低通滤波系数 a , 会兼顾灵敏度和实时性要求, 适于机上陀螺仪的信号滤波降噪。

针对加速度计输出信号的周期性特点，以及干扰源同样为机上电机的高频振荡，选择了滑动窗口滤波。滑动窗口滤波是综合设定时间长度的输出均值，当前输出受窗口内输出历史的影响。滑动窗口滤波算法由于每次只需采样一次数据，大大缩短了滤波时间，且该算法采集的最近的 N 次数据使得算法有较高的响应速度^[13]。公式见 (8)：

$$y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (8)$$

磁力计滤波因其数据较为稳定但容易受磁场影响的特性，同样选择了滤波系数 α 较大、输出稳定的低通滤波。

通过以上滤波取得原始数据后，由于传感器自身漂移等问题，这些数据还不能直接使用，需要进一步采用互补滤波的方法进行处理。

$$q(t+T) = q(t) + \frac{dq}{dt}T \quad (9)$$

式中， q 为欧拉公式中的四元数， T 为周期， t 为时间。将滤波后的数据带入公式 (9)，可求得三轴欧拉角^[14]。

$$\begin{cases} \varphi = \arcsin[2(q_0 \times q_2 - q_1 \times q_3)] \\ \theta = \arctan\left[\frac{2(q_0 \times q_1 + q_2 \times q_3)}{1 - 2(q_1^2 + q_2^2)}\right] \\ \psi = \arctan\left[\frac{2(q_1 \times q_2 + q_0 \times q_3)}{1 - 2(q_2^2 + q_3^2)}\right] \end{cases} \quad (10)$$

式中， φ 为飞行器的横滚角， θ 为飞行器的俯仰角， ψ 为飞行器的偏航角。列阵中各架飞行器的三轴欧拉角通过数据链路传送到地面站，作为列阵的基础数据，以便后续列阵调整时的位置依据。飞行器位置与姿态感知系统流程如图 4 所示。

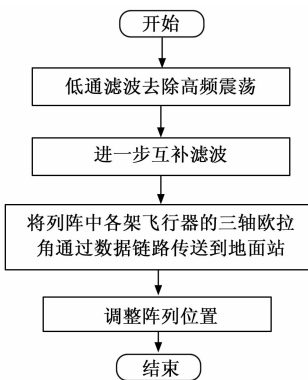


图 4 飞行器位置与姿态感知系统流程

1.4 飞行器列阵航路控制子系统设计

飞行器列阵航路控制子系统为地面站控制的核心设备，硬件形式为一台高性能工业控制计算机，操作系统平台为 Windows7。

经过上述两个子系统的数据采集，已经为飞行器列阵的航迹规划和队形排布提供了数据基础，飞行器列阵航路控制子系统可根据采集到的数据，对每一架飞行器的动作进行规划设计，发出动作调整指令。

航迹规划是列阵飞行控制的核心步骤，即根据给定任务的预设目标进行解算分解，生成列阵中每一架飞行器的

飞行航迹规划^[15]。为简化操控，飞行器列阵的飞行路线作为一个整体设定，具体队形变换预设几组程序。单架飞行器一次的飞行航线由若干个有序的控制航点组成，地面站根据队形的设置要求解算出每一架飞行器距离队形中心的相对位置，自动发送给飞行器，由多个飞行器演示列阵飞行功能。解算的流程为：

首先，添加规划的航迹点。针对每一架飞行器生成规划航迹点的序号、经度、纬度和高度序列信息。规划飞行器飞行的偏航角，这样呈现出来的飞机朝向即为规定的飞行器飞行朝向。

其次，列表显示为每一架飞行器生成一个列表控件，用来规划和记录航迹点的信息。

再次，修改航迹点。根据飞行器列阵航路控制子系统计算出的规划数据，对比雷达监测子系统测得的飞行器空间位置数据和机上下传的三轴角信息，自动计算偏离量，并实时做出调整指令。

2 飞行器列阵飞行测试实验

2.1 测试环境与列阵飞行实验方案

为验证本文设计的正确性和有效性，开展飞行器列阵飞行测试实验。飞行器选用大疆精灵 3 型，数量设置为 50 架，飞行空域限定在城市周边空旷场地，保证方圆 5 km 之内具有良好通视条件，飞行器飞行高度不超过 150 m。本次实验主要考察飞行器列阵飞行智能控制系统对飞行器的控制和列阵规划能力，在预设一字形、“S”形、“矩阵”列阵中，飞行器位置信息、距离信息、横滚角、俯仰角、偏航角测量值与预设值的偏差。

实验中，第一阶段设定 50 架飞行器呈一字形等间距静态悬停，持续 5 min；第二阶段设定 50 架飞行器呈“S”形，保持 50 m 飞行高度自南向北匀速飞行；第三阶段设定 50 架飞行器呈矩阵队形，高度分别在 50~60 m 之间依次升降。

在控制系统软件界面中输入队形策略为“矩阵”队形。如图 5 所示。



图 5 飞行器列阵飞行智能控制系统操作界面

实验场景照片见图 6。

2.2 监测数据与实测效果

分别采集 50 架飞行器在 3 个阶段稳定状态下的参数瞬时值与预设值比较，观察数值的偏差情况，以此分析智能



图 6 飞行器列阵飞行智能控制实验场景图

控制系统的控制精细度。

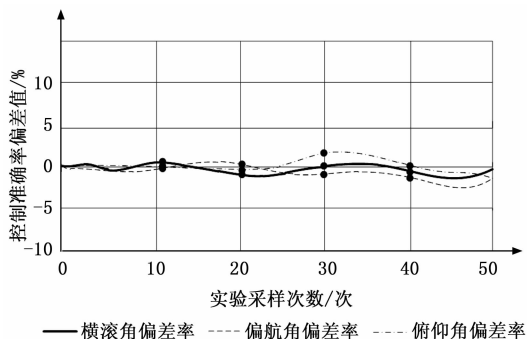


图 7 横滚角、俯仰角、偏航角准确率统计图

通过实验数据分析可知,采用所设计智能控制系统对列阵中各飞行器进行控制,其中,俯仰角偏差率较大,平均偏差值约为 2%;横滚角偏差率平均值为 1.5%,偏航角偏差率平均值约为 1%。分析可知该智能控制系统的偏差维持在 2% 以下,偏差率较低,说明各机能够按照预定的飞行轨迹完成飞行动作,且队形保持基本稳定,无论在静态悬停还是在交替升降的机动过程中,智能控制系统均能够可靠控制列阵中各架飞行器。实验结果证明本文设计的飞行器列阵飞行智能控制系统有效,精度可接受。

以文献 [2]、文献 [3] 方法作为实验对比方法,测试 3 种方法的飞行器列阵飞行智能控制所需时间,得到对比结果如图 8 所示。

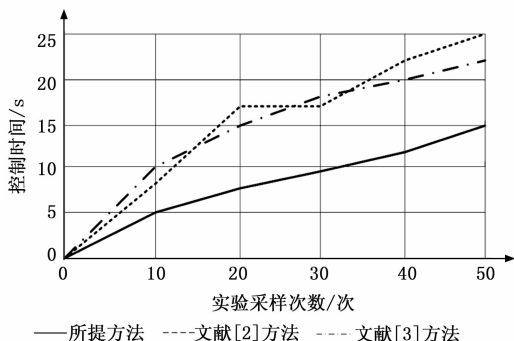


图 8 横滚角、俯仰角、偏航角准确率统计图

如图 8 可知,在 50 次实验中,文献 [2] 方法的控制时间为 25 s,文献 [3] 方法的控制时间为 22 s,而所提方法

的控制时间为 15 s。对比结果可知,所提方法的控制耗时较短,控制效率高。

3 结束语

本文设计的飞行器列阵飞行智能控制系统实现了对 50 架飞行器自由编辑飞行路线、个性化任务分配的全自动操作流程,将监测与控制部分设置在地面站中,减小了飞行器的载荷负担,提升了应用潜能,规避了飞行器载荷有限导致使用受限的难题。在设计原理和理论分析中,飞行智能控制系统可支配的飞行器是没有限制的,但是考虑到位置解算与图像处理的数据量问题,系统还不能无限扩展。随着运算系统硬件升级,处理速度提升后,可对飞行智能控制系统进一步扩展升级,探索飞行器控制的新应用。

参考文献:

- [1] 段海滨,邱华鑫,陈琳,等. 无人机自主集群技术研究展望 [J]. 科技导报, 2018, 36 (21): 90-98.
- [2] 段海滨,李沛. 基于生物群集行为的无人机集群控制 [J]. 科技导报, 2017 (7): 19-27.
- [3] 邵俊倩,李成凤,孙剑. 带领导者和不同时滞的多无人机系统编队控制 [J]. 计算机与数字工程, 2017, 45 (12): 2383-2388.
- [4] 张苗苗,魏晨. 基于边 Laplacian 一致性的多无人机编队控制方法 [J]. 中国科学: 技术科学, 2017 (3): 43-49.
- [5] 熊涛,曹科才,柴运,等. 基于输入约束一致性算法的多无人机编队控制 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 907 (12): 56-61, 130.
- [6] 宗群,王丹丹,邵士凯,等. 多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49 (3): 1-14.
- [7] 吴云华,牛康,李磊,等. 基于 3D-APF 和约束动力学的无人机编队飞行控制 [J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40 (5): 1104-1108.
- [8] 沈林成,王祥科,朱华勇,等. 基于拟态物理法的无人机集群与重构控制 [J]. 中国科学: 技术科学, 2017 (3): 50-69.
- [9] 朱旭,闫茂德,张昌利,等. 基于改进人工势场的无人机编队防撞控制方法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38 (6): 961-968.
- [10] 李建东,方艳斌,禹海斌,等. 基于无人机的变电站环境监控系统的设计 [J]. 电子设计工程, 2019, 27 (13): 157-160.
- [11] 冯登超,梁力水,刘建强,等. 无人机低空告警监视系统结构设计探索 [J]. 电子测量技术, 2018 (9): 141-145.
- [12] 韩豫,孙昊,李雷,等. 基于无人机的建筑外墙裂缝快速检查系统设计与实现 [J]. 土木工程与管理学报, 2019 (3): 60-65.
- [13] 刘洋,马丽娜,刘磊. 无人机地面站飞行监控系统软件设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014 (1): 294-296.
- [14] 李京,黄良,王博禹,等. 无人机定位下绝缘子劣化状态检测系统设计 [J]. 电子设计工程, 2019, 27 (19): 15-18.
- [15] 师红宇. 基于机器视觉定位的吊装机智能控制系统设计 [J]. 西安工程大学学报, 2017 (2): 216-220.