

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)03-0089-05

基于自组网通信技术的 RTK 无人机航迹远程控制方法

陈岸, 聂文翔

(广东电网有限责任公司中山供电局, 广东 中山 528400)

摘要: 无人机飞行状态下与控制点距离较远, 受障碍物阻挡和大气环境的吸收、散射和反射作用, 传输信号存在衰减风险, 不利于控制信号的传输, 影响航迹控制效果。针对这一问题, 设计了基于自组网通信技术的 RTK 无人机航迹远程控制方法。将自组网通信技术作为远程控制信号的传输媒介, 建立无人机与地面控制站之间的直接联系, 并根据多普勒效应分析信号衰减程度并进行补偿, 通过轮询调用的方式, 确保全部通信节点都能参与到信号传输中。然后, 分析回传信息解析无人机的偏航参数, 以过渡圆弧的方式修正控制其回到预期航迹线路, 实现对 RTK 无人机的远程航迹控制。经过实验验证可知, 依据该方法得出的航迹控制结果圆概率误差较小, 航迹控制效果较好, 能满足 RTK 无人机的飞行控制需求。

关键词: RTK 无人机; 自组网通信技术; 无人机航迹; 航迹控制; 远程控制

中图分类号: TP273; V271

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)03-0089-05

Remote control method for RTK unmanned aerial vehicle trajectory based on self-organizing network communication technology

CHEN An, NIE Wenxiang

(Zhongshan Power Supply Bureau of Guangdong Grid Co., Ltd., Zhongshan 528400, Guangdong, China)

Abstract: When the drone is in flight, it is far from the control point and is obstructed by obstacles and affected by the absorption, scattering, and reflection of the atmospheric environment. There is a risk of attenuation in the transmission of signals, which is not conducive to the transmission of control signals and affects the effectiveness of trajectory control. In response to this issue, this study designs a remote control method for the trajectory of RTK unmanned aerial vehicles based on self-organizing network communication technology. It uses self-organizing network communication technology as a transmission medium for remote control signals, establishes a direct connection between drones and ground control stations, analyzes the degree of signal attenuation based on Doppler effect and compensating for it, ensures that all communication nodes can participate in signal transmission through polling calls. Then, it analyzes the feedback information to analyze the yaw parameters of the drone, and adjusts and controls it to return to the expected trajectory path through a transition arc, achieves remote trajectory control of the RTK drone. Through experiments, it is known that the trajectory control results obtained by this method have a small probability error and good trajectory control effect, which can meet the flight control requirements of RTK unmanned aerial vehicles.

Keywords: RTK drone; ad hoc network communication technology; drone trajectory; track control; remote control

无人机技术在生活中的很多领域都被广泛应用, 例如地质测量、影视制作等领域。无人机位置的精准获取可以通过 RTK 无人机实时动态差分技术实现。在其应用过程中, 为了能够使无人机实现预期的飞行任务, 对其航迹进行控制十分关键^[1]。基于此, 航迹的控制受到了领域内的高度重视, 很多研究人员提出了航迹控制方法。

文献[2]中提出了一种基于自适应模糊跟踪算法的航迹控制方法。该方法根据时变全状态约束数据建立逼近未知的动态函数, 将其与努斯鲍姆型函数结合, 求解航迹控制的邻域边界。然后利用自适应模糊跟踪算法建立

结合双函数的非线性系统, 通过跟踪系统参数, 得到相应的航迹控制策略。但自适应模糊跟踪算法所采用的模糊逻辑主要基于历史经验, 在实际应用中具有一定的不确定性。文献[3]中提出了一种基于非线性模型预测的航迹控制方法。该方法根据自由度参数定义航迹控制的角度约束以及状态约束, 在该约束的基础上建立相应的动力学模型。引入多重打靶算法为动力学模型添加环境特征。通过定义模型的优化范式设计相应的非线性模型预测控制器, 利用输入动态参数实现实时的航迹控制。但在预测控制的过程中, 输入的动态参数数据可能受到噪声的干

收稿日期: 2024-07-01; 录用日期: 2024-08-07

基金项目: 南方电网科技项目资助(GDKJXM20210488)

作者简介: 陈岸(1970—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 科技项目管理。

引用本文: 陈岸, 聂文翔. 基于自组网通信技术的 RTK 无人机航迹远程控制方法[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(3): 89-93. (CHEN An, NIE Wenxiang. Remote control method for RTK unmanned aerial vehicle trajectory based on self-organizing network communication technology[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(3): 89-93.)

扰,影响了预测值的计算。文献[4]中设计了一种基于多级影响图的航迹控制方法。通过计算预期的操纵角度定义相应的最优航迹路线,然后采用多级影响图建立最优航迹路线的三维模型,并通过变化率的控制,修正模型中的操纵角度偏差,生成相应的控制参数,实现航迹的控制。但单一依靠计算操纵角度难以有效处理复杂的航线布局。文献[5]中设计了一种基于改进蝴蝶优化算法的航迹控制方法。利用机器视觉技术分析环境中的障碍物点位,并由此建立三维环境模型。在该模型中,引入改进蝴蝶优化算法,用于分析避开障碍物后的航迹惩罚函数。根据该函数的计算结果,优化相应的奖励值,关联得到航迹控制参数。但改进的蝴蝶优化算法所采用的参数较少,容易陷入局部最优的状态。文献[6]中设计了一种基于跟踪预定义的航迹控制方法。建立奖励值跟踪预定义的带甲虫天线搜索算法,通过最小距离的计算,生成最优航迹控制策略。但该方法无法有效处理环境中突然变化的障碍物,存在较大的响应延迟。

基于上述分析,本研究设计了一种基于自组网通信技术的 RTK 无人机航迹远程控制方法。该方法通过自组网通信技术实现无人机信号的传输,结合 RTK 基站修正偏差误差,实现了较为准确的航迹远程控制。

1 RTK 无人机航迹远程控制方法

本研究设计的基于自组网通信技术的 RTK 无人机航迹远程控制方法能够实现无人机与地面控制站之间的高效通信和远程航迹控制,为无人机的应用提供了重要的技术支持。该方法的整体思路如图 1 所示。

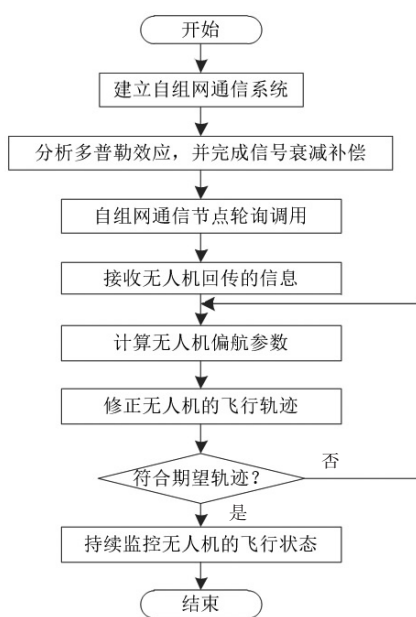


图 1 RTK 无人机航迹远程控制流程

Fig. 1 RTK drone trajectory remote control process

1.1 RTK 无人机实时信号传输

本研究采用数据通信的方法实现控制参数的传递,为此设计了基于自组网通信技术的 RTK 无人机实时信号传

输机制。

首先,通过自组网通信建立无人机与中继站或地面控制站之间的直接链路,减少对固定基站的依赖,提高了通信的灵活性和可靠性。其次,利用多普勒效应分析信号衰减程度并进行补偿。多普勒效应描述了信号源与接收器之间相对运动导致的信号频率变化^[7]。在无人机远程控制中,信号衰减的程度通过监测和分析多普勒频移被估算出来,并据此信号的发射功率或调制方式被调整,通过补偿衰减确保信号的稳定传输。最后,通过轮询调用的方式,每个节点都被确保有机会发送和接收数据,从而避免了信道资源的浪费和冲突。

按照如图 2 所示的形式,自组网通信的信号传输信道被划分为不同的频段。

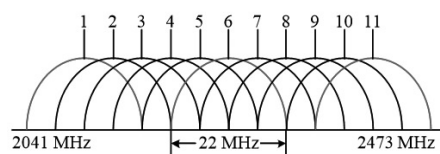


图 2 自组网通信信道频段划分

Fig. 2 Frequency band division of self-organizing network communication channels

如图 2 所示,本研究将自组网通信的信道划分为 11 个频段,且每个频段的带宽均完全一致,为 22 MHz。通过这样的划分得到 3 个完全不重叠的传输信道,即图 1 中的红色部分。将这 3 个完全不重叠的传输信道作为 RTK 无人机控制信号传输的正交信道^[8]。

考虑到由于 RTK 无人机非静止的信号传输点位,本研究基于多普勒效应原理,分析自组网通信传输的信号衰减问题。以频率偏移定量 f 反映信号衰减的程度,计算公式为

$$f = f_0 \frac{v}{c} \cos \theta \tag{1}$$

式中, f_0 表示正交信道的信号载频, v 表示无人机飞行与信号传输的相对速度, c 表示标准光速, θ 表示无人机飞行方向与信号传输所产生的电磁波之间的夹角^[9]。

根据计算所得的频率偏移量,为自组网通信的传输信号强度补偿相应的衰减值,由此定义基于自组网通信下,RTK 无人机实时信号传输的子载波间隔,计算公式为

$$f_m = \frac{f \times t}{T} (f_0 \times v + f) \tag{2}$$

式中, f_m 表示子载波间隔, t 信号传输时间, T 表示信号传输周期, v 表示无干扰环境下的信号传输速率。

利用该参数设定 RTK 无人机实时信号的传输时隙的长度,两者为负相关的定义关系。由于无人机对于移动要求较高,本研究将子载波间隔参数设定为较小的数值。

将设定好传输参数的自组网通信架构与 RTK 无人机连接。本研究采用了 MAC 协议中的轮询接入调度类协议。在无人机自组网中,通过轮询调用,可以确保控制信号能够按照预定的顺序和频率在节点之间传输,保证了航迹控制的实时性和准确性。

为传输数据设置 3 个回源节点,并在传输信道的轮询过程中执行调用操作。单次的轮询操作包含 6 次回源节点的调用,调用顺序为{1,1,1,2,2,3}。通过轮询调用的过程,建立无人机自组网通信的传输信道模型^[10-11],计算公式为

$$P(r) = f_m n^r - 10\eta \log \frac{d}{d_0} + f \quad (3)$$

式中, r 表示回源节点, $P(r)$ 表示相应节点的传输信道, n^r 表示调用次数,本研究中 n 的取值为 6, η 表示路径衰减指数, d 表示基站与无人机的实时距离, d_0 表示 RTK 基站与无人机信号自组网通信接收信道之间的参考距离。

在式(3)中,本研究设定的参考距离为 1 m。将这一传输信道模型作为 RTK 无人机远程控制信号实时传输的渠道,实现基于自组网通信技术的 RTK 无人机实时信号传输。

1.2 解析无人机偏航参数

在满足子网通信的信道模型的基础上,通过分析 RTK 无人机的实时定位信息分析当前的偏航状态。

以无人机的机头方向为 x 轴建立参考坐标系,如图 3 所示。

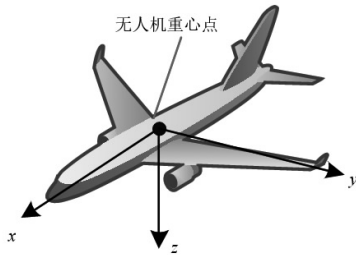


图 3 参考坐标系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of reference coordinate system

如图 3 所示,本研究以无人机的质量中心为原点,机头方向、机翼方向以及机体平面的垂直方向为三相坐标轴建立参考坐标系。

在参考坐标系下建立无人机的角动力学方程,计算公式为

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = -I^{-1} \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \times (I^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}) \right) + I^{-1} \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{Z} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, \dot{X} 、 \dot{Y} 、 \dot{Z} 分别表示无人机在参考坐标系三个轴向上的角加速度, I 表示无人机在飞行过程中的惯性积, X 、 Y 、 Z 表示无人机在参考坐标系中的轴向合外力矩, \ddot{X} 、 \ddot{Y} 、 \ddot{Z} 表示相应轴向上的力矩分量。

由于无人机的飞行过程受到地球重力偏差的影响^[12],因此,本研究将重力投影到角动力学方程中,以修正无人机实际的动力误差。重力投影的过程为

$$G = m \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -g \sin \mu \\ 0 \\ g \sin \mu \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, G 表示重力投影, m 表示无人机的机体重量, g 表示无人机实时位置的重力加速度, μ 表示无人机的质心动力。

利用添加了重力投影的无人机角动力学方程定位无人

机当前的航迹点位,并在参考坐标系中表达该定义信息,即

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{X} & G \cdot \tan \alpha & \sin \alpha / \cos \beta \\ \dot{Y} & \cos \alpha & \sin \alpha \\ \dot{Z} & \sin \alpha \cos \beta & G \cot \beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, \hat{x} 、 \hat{y} 、 \hat{z} 表示了无人机在参考坐标系中的点位坐标, α 表示无人机飞行方向与水平方向的夹角, β 表示无人机机身的旋转角^[13]。

通过无人机在参考坐标系下的实时定位坐标信息,与预期设定的航迹线路差值计算,以此分析无人机的偏航参数。

1.3 RTK 无人机航迹远程控制

利用上述计算所得的无人机偏航参数,在无人机的飞行控制信号中对其补偿修正,并通过自组网通信将控制参数远程传输到无人机的信号接收端中,实现对无人机航迹的远程控制。

考虑到远程距离下,无人机定位的偏航参数在自组网通信链路中存在一定的回传延迟^[14],本研究采用双差观测将回传数据与 RTK 基站数据结合,修正定位信息的回传延迟误差。双差观测的处理过程为

$$D = -A(\phi - s)^p - a\left(\frac{H}{c}\right) \quad (7)$$

式中, D 表示双差观测误差值, A 表示接收机的钟差, p 表示参考坐标系下回传的定位信息, ϕ 表示 RTK 概略坐标, ρ 表示双差载波相位, a 表示自组网通信载波相位的整周模糊度, H 表示 RTK 基站与观测站之间的距离。

将修正延迟误差后的定位信息与当前的偏航参数结合,计算航迹控制的偏航修正参数,将偏航的无人机调度到预期的航迹线路中^[15]。考虑到无人机在飞行过程中转向为弧形转向,本研究设计了过渡圆弧的偏航修正方法,如图 4 所示。

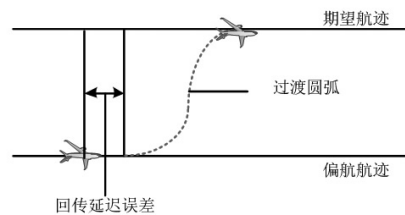


图 4 过渡圆弧偏航修正示意图

Fig. 4 Schematic diagram of transition arc yaw correction

如图 4 所示,在考虑了无人机定位信息回传误差修正的基础上,以双段过渡圆弧将无人机控制到期望航迹的线路中。两端过渡圆弧的控制约束为

$$\begin{cases} Q_1 = R_{\min} \times \sin\left(-\frac{\pi}{2} + D \cdot V\right) \\ Q_2 = R_{\min} \times \left(\frac{l}{2V} + D \cdot V\right) \end{cases} \quad (8)$$

式中, Q_1 和 Q_2 分别表示两段圆弧的控制参数, R_{\min} 表示无人机所能达到的最小转向弧度, V 表示无人机的飞行速度, l 表示偏航轨迹与期望轨迹之间的直线距离,即上述

分析的偏航参数。

通过过渡圆弧的方法修正无人机在飞行过程中的偏航行为。在此基础上,利用自组网通信的实时信息,不断修正在飞行过程中的轨迹误差,保证实际航迹的准确性,实现 RTK 无人机的远程控制。

2 实验与结果分析

为验证上述设计的基于自组网通信技术的 RTK 无人机航迹远程控制方法的实际应用性能,设计如下对比实验并对结果展开分析。

2.1 无人机参数及实验数据

本次实验所面向的 RTK 无人机为自主研发的无人机设备。在无人机的飞控系统中嵌入搭载了 RTK 定位程序的微处理器芯片,由此构造出 RTK 无人机系统。该无人机为一体机架构,飞行参数如表 1 所示。

表 1 无人机飞行参数设计

Tab. 1 Design of flight parameters for drones

参数项	参数设计
对称电机轴距	600 mm
最大起飞重量	3.5 kg
差分模式	RTK
作业飞行速度	12 m/s
额定续航时间	60 min
悬停精度	水平: (1±1 ppm) cm
	垂直: (2±1 ppm) cm

以如表 1 所示参数的 RTK 无人机为航迹控制的对象开展本次测试。

在无人机航迹测试的场地范围内,设置 RTK 基站,相应的参数设置如表 2 所示。

表 2 RTK 基站参数设置

Tab. 2 RTK base station parameter settings

序号	参数项	参数设置
1	输出格式	NMEA-0183
2	定位输出频率	1~20 Hz
3	差分支持	CMR
4	平面定位精度	$\pm(8+1\times 10^{-6})$ mm
5	高程定位精度	$\pm(15+1\times 10^{-6})$ mm
6	静态定位精度	$\pm(2.5+0.5\times 10^{-6})$ mm
7	通讯频率	30 W
8	通讯网络协议	NTRIP
9	通讯频段	116
10	外部供电	5.5 VDC/2A
11	GNSS 通道	440

考虑到 RTK 无人机设备所能够携带的能源有限,将本次实验中无人机目标飞行的最远航距设定为 15 km。实验场景如图 5 所示。

在本次实验中,共统计 RTK 无人机的 5 项数据,如图

6 所示。



图 5 实验场景照片

Fig. 5 Experimental scene diagram

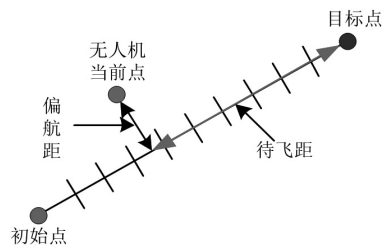


图 6 航迹控制实验数据统计项目

Fig. 6 Track control experiment data statistics project

按照如图 6 所示的项目统计不同方法对 RTK 无人机的航迹控制结果,由此分析相应的实践性能。

2.2 可行性验证

实验在为 RTK 无人机设定预期的飞行航线后,以无人机的起始飞行的点位为高程数据的基准零点。在此基础上,采用本研究所提方法对其飞行航迹进行控制,得到其飞行航迹结果如图 7 所示。

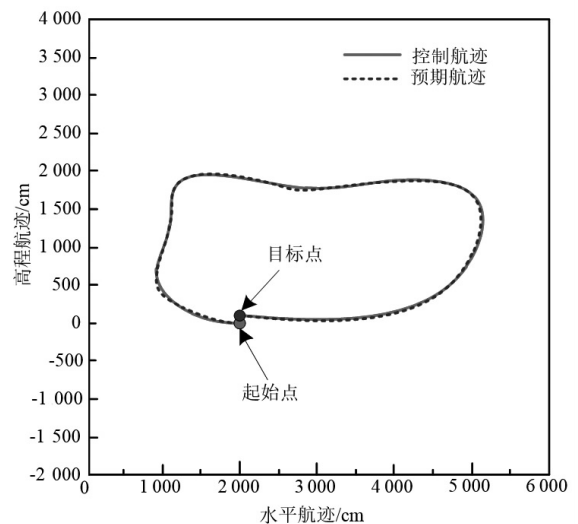


图 7 RTK 无人机控制航迹

Fig. 7 Control trajectory of RTK unmanned aerial vehicle

在本次测试中,RTK 无人机实际飞行航迹能够完美地达到目标飞行点位,途中的飞行航迹虽并未完全一致,但大体航迹相同。虽出现两次微小的航迹偏差,但及时通过过渡圆弧完成了远程修正,能够较好地完成飞行任务。

从这一实验结果可以初步判断,本研究所提方法在 RTK 无人机航迹的远程航迹控制实践中具备一定的可行性。

2.3 评价指标

为了能够定量分析远程控制效果,实验采用圆概率误差(CEP)来分析不同方法航迹控制结果的有效性。其计算方法为

$$C = 0.56\sigma_x + 0.62\sigma_y \quad (9)$$

式中, C 表示圆概率误差, σ_x 和 σ_y 分别表示无人机在控制下的航迹与预期航迹在 x 和 y 两个轴向上的偏差距离。

通过对不同方法控制下所得的 RTK 无人机航迹 5 项数据的记录与计算,分析相应的控制航迹的圆概率误差值。这一结果评价指标能够定量分析所控制无人机航迹的实际点位落在预期航迹点位特定半径上的概率,由此评价其控制精度。计算所得的指标数值越小,则表明相应方法对无人机航迹的控制精度越高,具备更高的实践应用有效性。

2.4 有效性验证

为了保证本次实验结果的有效性,分别采用文献[2]、文献[3]以及文献[4]所提出的航迹控制方法作为本次实验的对比方法。基于上述设定的结果评价指标,分析并讨论不同方法控制结果的有效性。

经过实验,得到不同方法下的航迹控制结果如图 8 所示。

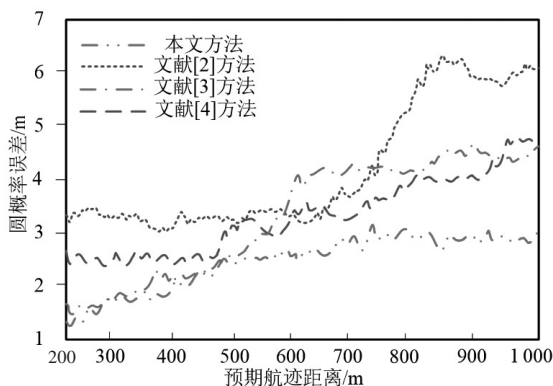


图 8 不同航迹控制方法圆概率误差结果

Fig. 8 Circular probability error results of different trajectory control methods

基于这一实验结果数据,可知随着为 RTK 无人机设定的预期航迹的距离越长,不同控制方法相应的飞行航迹结果的圆概率误差值都呈现出数值变高的趋势,但仍有着较大的差别。其中,文献[2]所提方法控制下的航迹圆概率误差在预期航迹距离小于 700 m 时数值较小,但大于这一节点后,数值大幅度上升,最大达到 6.24 m。文献[3]以及文献[4]所提方法控制下的航迹圆概率误差最大值较为接近,分别为 4.51 m 和 4.63 m。而本研究所提方法控制下的航迹圆概率误差数值整体均比较小,最大值仅为 2.88 m,与其他几种方法相比有着较大程度的降低。

从这一实验结果可知,本研究所提方法在 RTK 无人

机的航迹远程控制实践中,所表现出的精度更高,具备更高的实践应用价值。

3 结论

本研究面向 RTK 无人机在执行飞行任务领域,提出了基于自组网通信技术的 RTK 无人机航迹远程控制方法。经过实验可知,该方法在实践应用中表现出了较高的控制精度,有着较好的应用前景。但本文研究内容难免存在一定的不足之处。本研究主要针对 RTK 无人机在设定了预期轨迹的航迹控制方法展开了研究。但在部分领域中,存在不确定条件下的无人机飞行任务,在该领域中的航迹控制尚有继续深入研究的空间。在后续的研究工作中,还需对多类型飞行条件下的 RTK 无人机航迹控制展开深入的研究,以进一步提高 RTK 无人机在实际生活中的应用性能。

参考文献

- [1]郭林,刘飞,李佳钰,等. 基于能量管理策略的太阳能无人机航迹跟踪控制[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(2):409-418.
- [2]TANG FNIU B, WANG H, et al. Adaptive fuzzy tracking control of switched MIMO nonlinear systems with full state constraints and unknown control directions[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II:Express Briefs, 2022, 69(6):2912-2916.
- [3]刘瑛,王俊,许红蕊,等. 基于多级影响图的复杂机动动作最优航迹控制模型[J]. 火力与指挥控制, 2023, 48(12):71-78, 84.
- [4]马天珩,宁杨阳. 基于非线性模型预测控制的无人船航迹跟踪控制方法[J]. 船舶工程, 2023, 45(2):123-130, 166.
- [5]丁敏,夏兴宇,邹永杰,等. 基于改进蝴蝶优化算法的无人机 3-D 航迹规划方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(5):851-858.
- [6]KHAN A T, LI S, LI Z. Obstacle avoidance and model-free tracking control for home automation using bioinspired approach[J]. Advanced Control for Applications:Engineering and Industrial Systems, 2022, 4(1):11-14.
- [7]贾江山. 基于无人机遥感技术的水库水位自动化预警方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(8):158-161.
- [8]唐嘉宁,杨昕,周思达,等. 未知环境下改进 DDQN 的无人机探索航迹规划研究[J]. 电光与控制, 2023, 30(4):23-27, 33.
- [9]俞炜平,刘志鹏,高亚洲,等. 无人机实时动态精准定位技术研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(12):51-54.
- [10]张林杰,黄筱,饶维冬,等. 网络 RTK 和 PPK 辅助水利工程免像控无人机倾斜摄影测量三维建模分析[J]. 测绘通报, 2023(4):115-120.
- [11]黄毓,顾呈剑,周就猫,等. 内置 RTK 无人机航拍技术在土地整治项目测绘与辅助规划设计中的应用[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2022, 37(3):87-94.
- [12]凌琛. 考虑能耗的无人机路径规划及海洋捕食者算法求解[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(1):5-8, 13.
- [13]李伟,谢华伟,韩俊庆,等. 基于无模型自适应 PD 控制的欠驱动船舶航迹控制[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(13):21-25.
- [14]刘训文,徐超,陈再发. 事件触发的自适应 PID 海洋水面船舶航迹跟踪控制[J]. 上海海事大学学报, 2023, 44(2):11-17.
- [15]孟永东,袁昌纬,田斌,等. 基于无人机 RTK 及空中三角测量的坡体表面位移监测试验研究[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(5):2188-2195.