

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.04.022

变构型三栖机器人的控制与仿真模型研究

张立超^{1a}, 姬书得^{1a}, 胡为^{1b}, 任赵旭², 龚鹏^{1c}, 王留芳²

(1. 沈阳航空航天大学 a. 航空宇航学院; b. 自动化学院; c. 机电工程学院, 辽宁 沈阳 110136;

2. 沈阳黑晶石智控科技有限公司, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 为了丰富三栖机器人的系统解决方案, 基于现有的三栖设计方案优缺点和特性提出新型变构型三栖机器人方案, 针对空中、地面和水面 3 种不同的运动环境, 研究对应的动力学模型和控制模型, 并对模型进行仿真实验。结果表明: 该控制模型可以对三栖机器人进行多模式下的姿态控制、位置控制以及路径跟随控制等, 对未来三栖机器人的设计应用具有一定的指导意义。

关键词: 三栖机器人; 运动控制; 结构设计; 控制仿真

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2024)04-0119-05

Research on Control and Simulation Model of Variable-configuration Three-perch Robot

ZHANG Lichao^{1a}, JI Shude^{1a}, HU Wei^{1b}, REN Zhaoxu², GONG Peng^{1c}, WANG Liufang²

(1. a. School of Aeronautics and Astronautics; b. School of Automation; c. School of Mechanical and

Electrical Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Shenyang Black Rock Wisdom Control Technology Co., Ltd., Shenyang 110136, China)

Abstract: In order to enrich the system solution of three-perch robot, a new variational three-perch robot scheme was proposed based on the advantages and disadvantages and characteristics of the existing three-perch design scheme. The corresponding dynamic model and control model were studied in three different motion environments of air, ground and water, and the simulation experiments were carried out on the models. The results show that the control model can control the attitude, position and path following of the three-perch robot in the multi-mode, which has certain guiding significance for the design and application of the three-perch robot in the future.

Keywords: three-perch robot; motor control; structure design; control simulation

0 引言

为解决单一功能智能化无人装备难以胜任复杂环境下的工作任务, 复合式智能化无人装备应运而生, 其中水陆两栖无人车^[1]、陆空两栖飞行无人车^[2-3]、水空两栖无人机^[4]以及本文探究的水陆空三栖无人飞行器^[5], 因具有灵活多变的模式和较强的环境适应能力, 已经成为目前智能化无人装备的研究领域热点。其中国内外比较有代表性的三栖智能化无人装备中, 包括宾夕法尼亚大学 PICCOLI 等^[6]在 2014 年设计的一款可密封打包的多功能、便携且可快速部署的三栖无人平台。该三栖无人平台能够在单包装中通过折叠拆卸实现包括空中、陆地和水面运动在内的多种类别的

转换, 并且携带方便且成本低廉。中南大学钟国梁教授团队^[7]在 2020 年研发出一款具有倾斜转子结构的三栖机器人, 采用常见四轴飞行模式, 通过在机体下的 4 条腿上安装 4 个被动轮实现地面步行与行驶, 通过倾斜在左右两边的电机实现水中运动。天津理工大学张天开^[8]在 2021 年设计的一款分离式子母机的三栖机器人, 采用常见四轴飞行模式, 通过主体下方安装 4 个主动轮实现整体运动释放主体下方的子机, 使母机漂浮于水面, 子机通过机轮在水中运动。

本文提出了一种新型变构型三栖机器人的总体设计, 根据设计好的变构型三栖机器人总体模型, 推导动力学和运动学方程, 建立合适的动力学模型和运动学模型; 根据动力学和运动学模型设计合理的

基金项目: 军委科技委重点探索项目(JH2021002N)

第一作者简介: 张立超(1997—), 男, 江西抚州人, 硕士研究生, 研究方向为航空智能装备与自主控制技术, 1652034191@qq.com。

变构型三栖机器人控制器模型;利用设计好的控制器模型对建立好的动力学和运动学模型进行控制仿真,验证模型和控制器的可靠性和正确性。

1 系统总体设计与结构设计

变构型三栖机器人设计目标是使其能够在地面、水面以及空中执行侦察任务,主要能够在狭小空间执行地面侦察、水上侦察、遇到地面障碍物时的空中越障以及空中侦察等。为了满足小巧轻便、结构简单以及能够在复杂环境下实现功能的需求,本文提出了一种多驱动模式的变构型三栖机器人的总体设计方案。如图1所示,采用Pixhawk飞控板为核心,控制多驱动模式的变构型三栖飞行器所需的多种电机及变构型模块;通过电池、供电板和电压转换模块为控制板以及电机等供电。

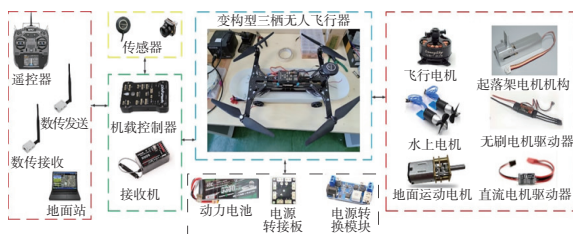


图1 新型多栖飞行器总体设计图

为实现多模式运动以及在狭小空间执行任务的要求,本文设计了对应的运动组件和变构型组件,主要分为主体框架、壳体、空中动力组件、陆地动力组件、水上动力组件以及空中和陆地的变构型组件,如图2所示。

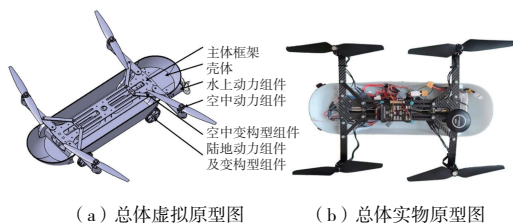


图2 变构型三栖机器人总体结构图

飞行模式包括机臂收缩与展开两种状态,收缩状态时,可减少宽度方向的空间,增强地面模式和水上模式对地形的通过性及狭窄空间的避障能力;伸展状态时,为与四旋翼无人机一致的飞行模式状态,如图3所示。

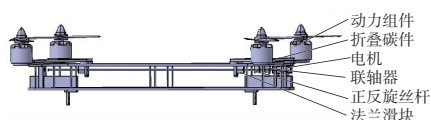


图3 飞行模式变构型组成图

陆地模式包括车轮收缩和下放两个状态,收缩状态时,减少了高度方向的空间距离,将车轮等机构收缩到壳体内,减少空中模式和水上模式由于风和水产生的阻力;下放状态时,为四驱的地面模式行驶状态,如图4所示。

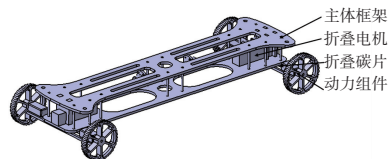


图4 陆地模式变构型组成图

水上模式时,为空中模式和陆地模式的收缩模式状态,从而减少外界环境造成的阻力和减少整体空间尺寸,如图5所示。

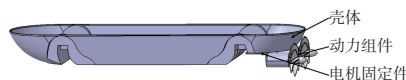


图5 水面模式组成图

2 动力学模型和控制器模型

变构型三栖机器人包含3种运动模式,分别为空中运动模式、地面运动模式和水面运动模式。每个模式的驱动机构和运动方程都不同,首先对不同运动模式进行建模,然后对不同模式的切换进行建模说明,最终形成统一的运动控制模型。

2.1 动力学模型

动力学模型采用惯性坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 和机体坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$ 进行运动描述,其物理量包括位置、速度、角度、角速度等,分别对应位置速度控制和姿态控制^[9]。惯性坐标系和机体坐标系之间的夹角就是模型的姿态角,也称欧拉角^[10]。

飞行模式状态的变化,都是力和力矩作用的结果。在惯性坐标系中,根据牛顿第二定律和欧拉方程,飞行器的线运动和角运动方程为

$$\begin{cases} \mathbf{F} = \frac{d\mathbf{P}}{dt} = m \frac{d\mathbf{V}}{dt} \\ \mathbf{M} = \frac{d\mathbf{L}}{dt} = J \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{F}$ 为合外力; $\mathbf{V}$ 为质点的速度; m 为质量; $\mathbf{M}$ 为定轴的外合力矩; $\mathbf{L}$ 为动量矩。

三栖机器人在力和力矩的作用下,绕着机体的质心做平动和转动,可得三栖机器人在惯性坐标系下的飞行模式的非线性运动方程如式(2)所示^[11]。

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m} c_T (\sin\theta \cos\phi \cos\psi + \sin\phi \sin\psi) (\varpi_1^2 + \varpi_2^2 + \varpi_3^2 + \varpi_4^2) \\ \ddot{y} = \frac{1}{m} c_T (\sin\theta \cos\phi \sin\psi - \sin\phi \cos\psi) (\varpi_1^2 + \varpi_2^2 + \varpi_3^2 + \varpi_4^2) \\ \ddot{z} = \frac{1}{m} c_T \cos\theta \cos\phi (\varpi_1^2 + \varpi_2^2 + \varpi_3^2 + \varpi_4^2) - g \\ \ddot{\theta} = d c_T \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \varpi_1^2 + \frac{\sqrt{2}}{2} \varpi_2^2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \varpi_3^2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \varpi_4^2 \right) / I_x \\ \ddot{\phi} = d c_T \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \varpi_1^2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \varpi_2^2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \varpi_3^2 + \frac{\sqrt{2}}{2} \varpi_4^2 \right) / I_y \\ \ddot{\psi} = c_M (\varpi_1^2 - \varpi_2^2 + \varpi_3^2 - \varpi_4^2) / I_z \end{cases} \quad (2)$$

式中: c_T 为飞行器的综合升力系数; c_M 为转矩系数; ϖ_i 为各个螺旋桨的角速度 ($i=1\sim 4$); I_x 、 I_y 、 I_z 分别为对应轴的转动量。

地面模式与飞行模式相比,缺少了 z 轴平动、横滚运动和俯仰运动 3 个自由度。其物理量也包括位置、速度、角度、角速度等,在不发生滑动摩擦的情况下,三栖机器人前进速度如式(3)所示^[12]。

$$\begin{cases} v = (V_L + V_R) / 2 \\ V_L = \varpi_{L_Car} R \\ V_R = \varpi_{R_Car} R \end{cases} \quad (3)$$

式中: v 为系统速度; V_L 表示左轮的速度; V_R 代表右轮的速度; ϖ_{L_Car} 和 ϖ_{R_Car} 分别为左、右车轮的角速度; R 为车轮半径。

转向角速度如式(4)所示。

$$\varpi = \dot{\psi} = (V_L - V_R) / W \quad (4)$$

式中: ϖ 代表角速度, z 轴俯视顺时针方向为正; W 代表左右车轮与中轴面的距离。

可得地面运动模型如式(5)所示。

$$\begin{cases} \dot{x} = (\varpi_{L_Car} + \varpi_{R_Car}) R \cos\psi / 2 \\ \dot{y} = (\varpi_{L_Car} + \varpi_{R_Car}) R \sin\psi / 2 \\ \dot{\psi} = (\varpi_{L_Car} - \varpi_{R_Car}) R / W \end{cases} \quad (5)$$

水上模式与地面模式描述基本相同,该模式下主要是通过驱动两个电机来提供前平动的力以及转向的力矩,综合得出水上运动的运动模型如式(6)所示。

$$\begin{cases} \ddot{x} = c_{T_Ship} (\omega_{L_Ship}^2 + \omega_{R_Ship}^2) \cos\psi / m \\ \ddot{y} = c_{T_Ship} (\omega_{L_Ship}^2 + \omega_{R_Ship}^2) \sin\psi / m \\ \ddot{\psi} = c_{T_Ship} (\omega_{L_Ship}^2 - \omega_{R_Ship}^2) / I_z \end{cases} \quad (6)$$

式中: c_{T_Ship} 为水上模式的综合推力系数; ω_{L_Ship} 和 ω_{R_Ship} 分别为左、右螺旋桨的角速度。

2.2 控制器模型

变构型三栖机器人的控制包括模式切换控制和各个模式下的姿态控制和位置速度控制。对于模式切换,可使用远程遥控指令或自主环境识别进行切换。对于各模式下的状态控制,其输入均为电机的转速,电机转速则通过控制信号进行控制,并假设转速与控制信号为线性关系,输出为三栖机器人的位置、速度、角度、角速度等信息。各模式下的控制模型基本相同,下面首先对单个模式的控制模型进行建模,再使用模式切换将其连接成为统一的控制模型。

变构型三栖机器人在飞行模式、陆地模式和水上模式的控制模型均包含两层控制回路,分别为外环位置控制和内环姿态控制。对于飞行模式,需要通过位置控制器和姿态控制器输出为期望的力和力矩;控制分配模型根据输入的力以及力矩大小获取合理的电机转速;电机模型对每个电机的转速进行解算,得到合适的控制信号;最后将控制信号输入变构型三栖机器人的动力学模型,得出运动状态信息。对于陆地模式和水上模式,位置控制器只需对水平位置进行控制,姿态控制器则只需对偏航角进行控制,其余部分与飞行模式一致。单模式的控制框图如图 6 所示。

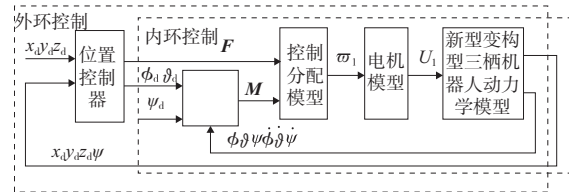


图 6 单模式的控制模型

变构型三栖机器人通过模式切换控制器进行控制,加入模式切换控制器后,系统的整体控制模型如图 7 所示。模式切换控制器共包含以下两个功能:首先根据控制指令或自动检测进行模式切换;其次未接收到模式切换指令时对控制器进行选择。

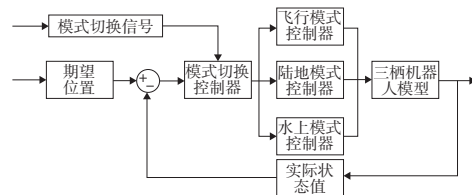


图 7 切换控制模型

3 控制仿真实验

变构型三栖机器人的运动控制仿真实验主要

考察控制器在 3 种运动环境下的控制性能,包括变构型三栖机器人姿态控制和位置控制仿真实验。根据推导动力学、运动学方程和所设计的控制器,在 Simulink 中搭建了变构型三栖机器人总体控制模型如图 8 所示,用于仿真控制实验。

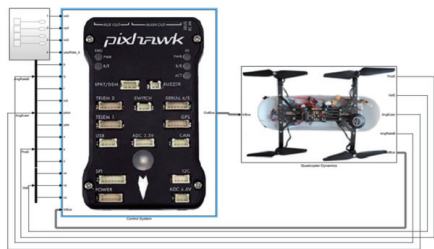
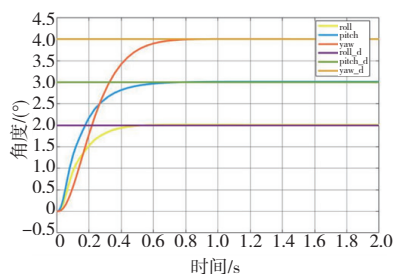
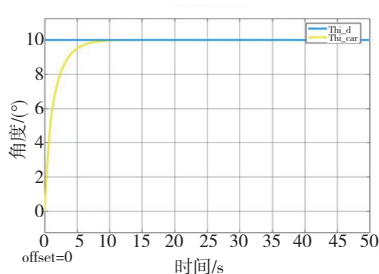


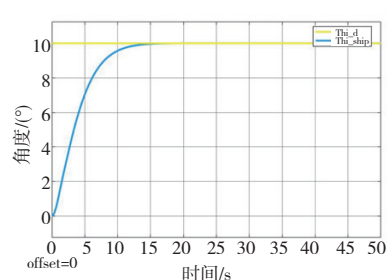
图 8 变构型三栖机器人总体控制模型



(a) 飞行模式姿态控制图



(b) 陆地模式姿态控制图



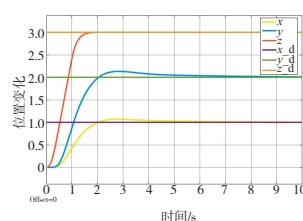
(c) 水上模式姿态控制图

图 9 姿态控制图

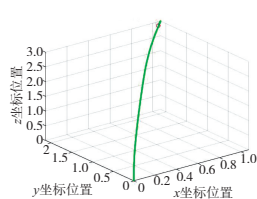
对于位置控制实验,飞行模式初始化位置为 $[0 \ 0 \ 0]^T$, 给予一个期望的位置 $[1 \ 2 \ 3]^T$, 对位置控制器性能进行仿真实验。仿真的位置坐标值变化如图 10(a) 所示, 三维坐标图如图 10(b) 所示。地面模式和水面模式初始化位置为 $[0 \ 0]^T$, 给予一个期望的位置 $[2 \ 3]^T$, 对位置控制器性能进行仿真实验。地面模式和水面模式位置控制时需要先判断偏航角与目标位置向量的夹角, 当夹角的绝对值在一定范围内时, 才进行位置控制, 否则先对偏航角进行控制, 使其满足范围要求。仿真结果如图 10(c) 和 10(e) 所示, 可以看出, 陆地模式需要静止 3 s 左右以及水面模式需要静止 7 s 左右后位置才开始变化, 说明在静止期间首先进行了角度控制, 到达合适角度要求后, 再进行角度和位置联合控制。由此可见, 通过合适的控制参数调整, 位置变化响应快且超调量较小, 基本快速完成位置变化控制; 坐标变化轨迹中可以看出三栖机器人的运动路线, 结果表明该控制器可以较好地完成位置控制任务。

在姿态控制实验和位置控制实验的基础上进行路径跟随实验, 设定飞行模式初始化位置为 $[0 \ 1 \ 0]^T$, 在空间里以螺旋线为参考航线, 航线

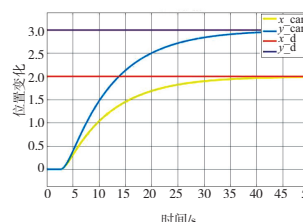
姿态控制仿真需对 3 种模式姿态进行模拟, 仿真中采用阶跃信号作为控制输入。对于飞行模式姿态控制实验, 变构型三栖机器人的初始化角度为 $[0 \ 0 \ 0]^T$, 给予一个期望的姿态角 $[2^\circ \ 3^\circ \ 4^\circ]^T$, 对姿态控制器的性能进行仿真验证, 仿真结果如图 9(a) 所示(本刊黑白印刷, 相关疑问咨询作者)。陆地模式和水上模式初始化偏航角度为 0° , 给予一个期望的姿态角 10° , 对姿态控制器的性能进行仿真验证, 仿真结果如图 9(b) 和图 9(c) 所示。由此可见, 通过控制参数调整后, 姿态角度控制响应速度快且无超调, 没有静态误差, 可以高效完成姿态角度控制任务。



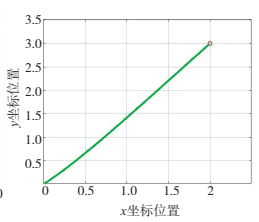
(a) 飞行模式每个通道分别控制



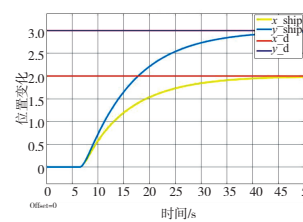
(b) 飞行模式三维控制



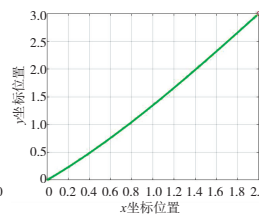
(c) 陆地模式每个通道分别控制



(d) 陆地模式三维控制



(e) 水上模式每个通道分别控制



(f) 水上模式三维控制

图 10 位置控制图

跟随性能如图 11(a) 所示,速度和位置能够快速响应航线变化,拥有较好的路径跟随能力。地面模式和水面模式初始化位置为 $[0 \ 0]^T$,在空间里

面以一条折线为参考航线,航线跟随性能如图 11(b) 和图 11(c) 所示,拐弯处可实时调整角度,能够准确地跟随期望路径。

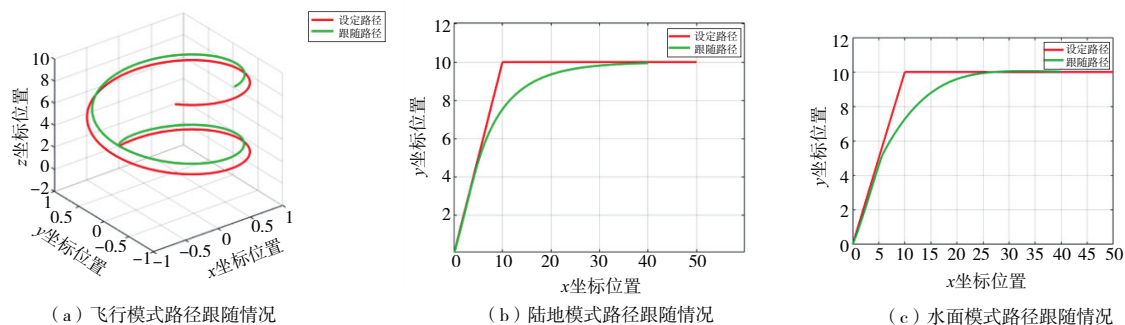


图 11 路径跟随情况图

4 结语

本文提出的一种新型变构型三栖机器人整体结构主要采用悬架式结构,结构简单、紧凑、轻便,利于减轻整体质量,一定程度上解决了多驱动模式三栖无人飞行器的质量冗余问题;设计了一种新型的空中变构型机构,减小了在陆地和水面模式时的横向空间占用量,可以更好地在复杂和狭小的区域执行非空中任务;地面变构型机构能够保证水面模式时,减少车轮以及车轮连接件在水中的阻力;保证两次变构型前后全机质心不变,有较好的过渡性;融合了水、陆、空 3 种模式,提高了无人智能装备全域地形的适应能力。在变构型三栖机器人的运动控制仿真实验中,对飞行模式、陆地模式和水上模式均进行了姿态控制、位置控制和路径跟随实验,通过控制参数调整后,控制效果良好,拥有响应速度快且无超调,没有静态误差,可以高效完成控制任务。

本文针对该变构型三栖机器人进行了总体设计研究以及动力学建模与控制方法的设计研究,为未来变构型三栖机器人的发展起到了借鉴和参考的作用。

参考文献:

- [1] 苏宗帅. 水陆两栖仿生机器人研究进展及应用[J]. 国防科技, 2019, 40(4): 50-54.
- [2] 兰二斌, 杨登杰, 覃继灿, 等. 陆空两栖机器人的结构设计及运动控制研究[J]. 工业控制计算机, 2019, 32(6): 58-60.
- [3] IZRAELEVITZ J S, TRIANTAFYLLOU M S. A novel degree of freedom in flapping wings shows promise for a dual aerial/aquatic vehicle propulsor[C]//2015 IEEE

International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seattle, WA, USA; IEEE, 2015: 5830-5837.

- [4] 刘福伟. 一种水空两栖无人艇的概念设计及其航行稳定性分析[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2014.
- [5] ZHU Y D, LI T, GUO Z Y, et al. Discussion on problems of triphibious robot control[C]//2018 11th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). Hangzhou, China; IEEE, 2019: 23-28.
- [6] PICCOLI M, REVZEN S, YIM M. SEAL Pack versatile, portable, and rapidly deployable SEa, air, and land vehicle[C]//2013 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR). Linköping, Sweden; IEEE, 2014: 1-6.
- [7] ZHONG G L, CAO J L, CHAI X Y, et al. Design and performance analysis of a triphibious robot with tilting-rotor structure[J]. IEEE Access, 2021, 9: 10871-10879.
- [8] 张开天. 一种新型三栖机器人的设计与控制[D]. 天津: 天津理工大学, 2021.
- [9] GUO Z Y, ZHU Y D, WANG M L, et al. System design and experimental analysis of an all-environment mobile robot[M]//Advances in Mechanism and Machine Science. Cham; Springer International Publishing, 2019: 1969-1978.
- [10] 时来富, 沈建新, 王启盛, 等. 四旋翼飞行器的模糊自抗扰姿态控制[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(3): 157-162.
- [11] FERNANDO H C T E, DE SILVA A T A, DE ZOYSA M D C, et al. Modelling, simulation and implementation of a quadrotor UAV[C]//2013 IEEE 8th International Conference on Industrial and Information Systems. Peradeniya, Sri Lanka; IEEE, 2014: 207-212.
- [12] 黄乐明. 电动四轮转向地面无人车辆导航控制仿真研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.

收稿日期: 2023-01-13