

# 一种高精度的自主抛投四旋翼无人机研究与应用

胡继华 李明洋 黄建亮 田海鑫 洛笑云

中山大学航空航天学院, 广东 深圳 518107

**[摘要]**自主四旋翼无人机蕴藏着丰富的教育资源,是理想的综合性工程训练教学载体,也是大学生竞赛的热门赛项。但其涉及多领域的融合交叉,学生常常无从下手,参赛选手也难以获得好成绩。本研究集成 RTK、机载电脑、深度相机和 YOLO 相关等技术,设计和开发一种高精度的自主抛投四旋翼无人机,能够进行实时高精度准确定位,自主飞行,自动发现目标和抛投负载。该无人机一方面应用到学生的无人机综合实训项目中,普遍提高学生创新能力和参加无人机相关竞赛的能力;另一方面应用到实际竞赛中,帮助学生取得好成绩,并利用竞赛成果优化实训内容,实现以赛促学,以赛促教。

**[关键词]**自主四旋翼无人机;高精度;YOLO;以赛促学

DOI: 10.33142/fme.v7i1.18807

中图分类号: V19

文献标识码: A

## Research and Application of a High-precision Autonomous Throwing Quadcopter Unmanned Aerial Vehicle

HU Jihua, LI Mingyang, HUANG Jianliang, TIAN Haixin, LUO Xiaoyun

School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Shenzhen, Guangdong, 518107, China

**Abstract:** Autonomous quadcopter drones contain rich educational resources and are an ideal comprehensive engineering training and teaching carrier, as well as a popular competition for college students. But it involves the integration and intersection of multiple fields, which often leaves students at a loss and makes it difficult for contestants to achieve good results. This study integrates RTK, onboard computer, depth camera, and YOLO related technologies to design and develop a high-precision autonomous throwing quadcopter unmanned aerial vehicle that can perform real-time high-precision positioning, autonomous flight, automatic target discovery, and throwing load. On the one hand, this drone is applied to students' comprehensive drone training projects, generally improving their innovation ability and ability to participate in drone related competitions; On the other hand, it can be applied to practical competitions to help students achieve good results and optimize practical training content using competition results, achieving the goal of promoting learning and teaching through competitions.

**Keywords:** autonomous quadcopter unmanned aerial vehicle; high-precision; YOLO; promoting learning through competition

### 引言

无人机技术融合了航空工程、机械工程、信息科学、通信技术、工业设计等多个学科多项应用技术,蕴藏着丰富的教育资源,是理想的综合性工程训练教学载体<sup>[1]</sup>。其中四旋翼无人机场地需求小,安全性高,是开展无人机教学的理想机型。很多学校开展了无人机实训项目或实验课程,涵盖无人机设计、组装、调试、机载电脑编程、任务飞行、无人机航拍和无人机仿真等内容<sup>[2-11]</sup>,很受学生欢迎,教学效果很好<sup>[12]</sup>。无人机相关的竞赛也很多,多数都包含四旋翼无人机,但是由于缺乏相关基础,很多参赛同学成绩不理想。

自主四旋翼无人机应该能够在无人直接干预的情况下,根据任务目标和实时感知到的环境信息、自身状态进行决策、规划和控制以应对环境的未知变化,同时具备良好的人机交互等能力<sup>[13]</sup>。一架完善的自主四旋翼无人机由相互依赖、相互制约的硬件系统和软件系统共同构成,研发难度大,且随任务场景复杂度的增加而增加,需要机械、控制、人工智能等多领域融合交叉,呈现出高度复杂性和系统性的特点。

自主四旋翼无人机是当前的技术热点之一,在学界和工业界都有广泛的研究,集中在飞行控制、感知与估计和运动规划等方面。带爪的四旋翼无人机研究也很丰富<sup>[14]</sup>,面向不同的应用场景夹爪差别很大,较成熟的应用集中在物流搬运和农业植保等方面。

本文面向无人机实训和竞赛场景,设计开发能够高精度定位和抛投的自主四旋翼无人机,包括硬件设计与组装、无人机校准与调参、算法设计与功能实现等环节。无人机一方面用于实训环节,让学生深度接触和使用自主无人机的相关技术,提高其动手能力和无人机创新水平;一方面用于相关赛事的赛前培训,提高学生的参赛能力,并用参赛成果不断更新优化无人机,实现以赛促学,以赛促教。

### 1 需求分析与设备选型

按照某竞赛的四旋翼无人机负重飞行赛项要求,无人机负载重物(1.5kg 矿泉水),自动起飞,自动上升到指定高度,自动飞到抛投区,自主寻找三个圆筒中直径最小的圆筒(半径 7.5cm),飞到该筒的正上方,将重物抛投入圆筒中。然后飞往侦查区,定位 5 个圆筒,再飞到各个圆

桶的正上方,识别圆筒中的危化品标识并回报。最后返航,回到起飞区,找到返航点,准确降落到返航点上。整个过程中,飞机不得飞出赛场区域,否则比赛失败。

从需求中可以看出,无人机定位需要达到厘米级的精度,才能保障其将矿泉水投入到最小圆筒内。而厘米级的定位精度只有 RTK (Real-time kinematic) 才能达到,且双天线 RTK 才能稳定定位(单天线 RTK 由于指南针精度不足导致定位精度差)。双天线 RTK 一般安装在 550mm 以上的机架上,才能保持其稳定工作,这要求无人机选型 550 机架。自动起飞和自主飞行,需要飞机有自主规划和导航的功能,即配备机载电脑。识别并定位随机位置的圆筒和危化品标识,需要深度相机和目标识别与分割技术,深度相机主流为 RealsenseD400 系列相机;识别与分割目标方面 YOLO 系列算法合适,速度快又能够在机载电脑上运行。另外,飞机需要挂载重物并抛投,则飞机应配置抛投器。因此,硬件上,需要 550 机架的四旋翼无人机,才够达到比赛要求的负重和续航时间要求,并在其上加装机载电脑、深度相机、抛投器、RTK 等组件和模块;软件上,安装配套的软件并进行二次开发,实现竞赛要求的功能。

## 2 无人机选型与装调

无人机选型与装调包括机架与配件选型、组装、无人机校准和 PID 调参等环节。

### 2.1 无人机选型与组装

四旋翼无人机的机架选型为 550 碳纤维机架,配套动力系统的电机型号为 3310,电调支持 DShot 协议;电池型号为 6000mha 6S 以上。飞行控制器选择开源的 Pixhawk

6c,以备后续无人机升级和功能拓展的需要。遥控器选配 8 通道的遥控器,支持蓝牙连接手机上的地面站 app。RTK 模块选型北天 U982 双天线模块,该模块可以直接定向,不需要电子罗盘。机载电脑选型 Jetson Orin nano 8G,支持 GPU 计算,可以大幅度提升 YOLO 算法的效率;深度相机选型 Intel Realsense D435 系列,能够提供对齐的图像和深度信息,实现目标定位;抛投器选择市面上主流的 20KG 投放器,能够稳定悬挂和抛投负载(图 1)。

安装时,RTK 模块的双天线安装在无人机的顶部载板上,它们连线的中点要位于无人机几何中心的中垂线上,确保 RTK 实时定位的结果就是无人机的位置。机载电脑安装在分电板的下一层,相对靠近飞控,方便连线;其下一层为电池层,用于放置动力电池,电池比较重,为避免其滑动对无人机质心带来的影响,用魔术贴固定电池,方便电池拆装。电池层板下方是最下层,安装深度相机、抛投器位置,抛投器的抛投点最后位于无人机的中垂线上,以保持无人机飞行和抛投后的稳定性;深度相机朝下安装,才能准确识别和定位目标;其安装位置需要离开抛投器一定的距离,避免无人机负载(矿泉水瓶)的晃动影响相机的视野,从而对目标的定位造成影响。因此,电池层的载板要合理设计,满足电池、深度相机、抛投器的安装固定要求。

接线方面,机载电脑通过串口与飞行控制器 TELEM2 端口连线,实现飞行控制指令发送和信号接收。深度相机通过 USB3.0 线与机载电脑相连,按照要求发布图像信息和深度信息。抛投器的信号线接到飞行控制器的辅助通道上,这样机载电脑可以通过飞行控制器开关抛投器。

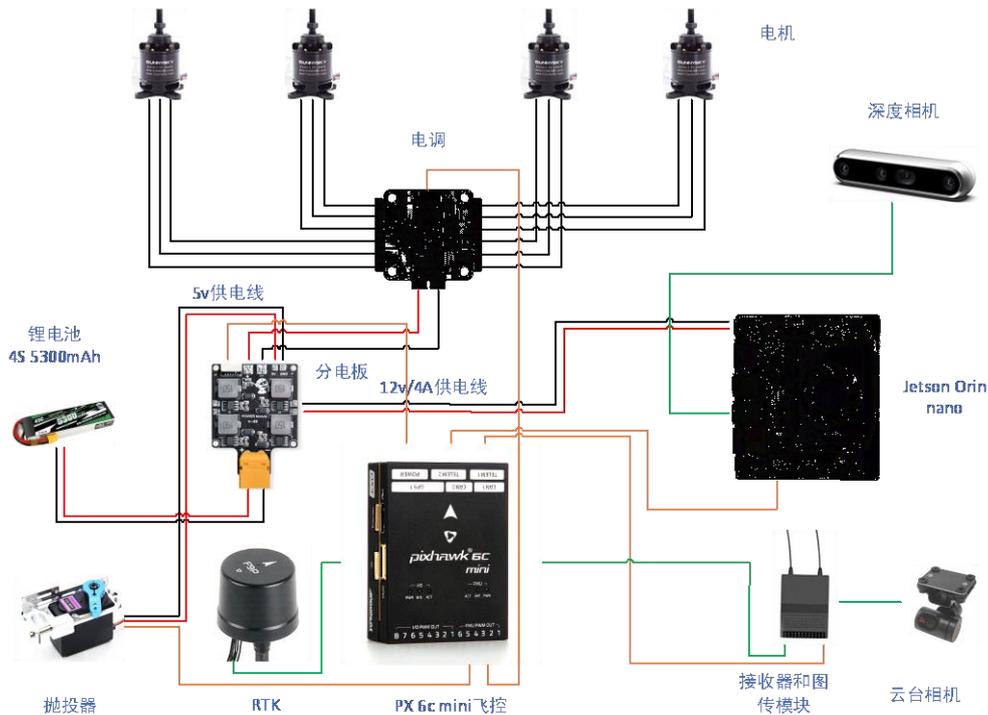


图 1 无人机连线和供电示意图

供电方面，机载电脑、抛投器需要单独供电，其中机载电脑要求稳定的 12-19 V/4A 的直流电，抛投器要求 5V/4A 直流电，需要给他们配置相应的稳压模块，以保障其正常工作。为了节省空间，选配一个分电板，其上有 2 路以上 12-19V/4A 供电接口，一路给机载电脑供电，一路备用，2 路 5V/4A 供电接口，一路专供飞控，一路供电抛投器。分电板一边直连锂电池，一边直连电调，为电调电机供电。

### 2.2 无人机校准

无人机安装完成，全部电源和线路连接确认无误后，将飞行控制器通过 Type-C 线连接到安装了 qGroundControl 软件的电脑上，按照步骤进行固件刷写、机架设置、传感器校准、遥控器校准、飞行模式设置、执行器设置和调试等校准和设置，最后是参数的设置，包括机载电脑连接飞控参数、RTK 参数设置、图传参数、RTK 服务账号设置等。设置测试无误后，到室外手动测试无人机飞行，如果飞行器能够进行定点、定高飞行，则无人机组装成功。

### 2.3 PID 调参

无人机校准后，虽然可以通过遥控器手动飞行，但是一般飞机操控的灵活性不足，稳定性也不够，达不到自主飞行的要求，需要进行调参。

Pixhawk 6c 飞行控制器采用比例 (P)、积分 (I)、微分 (D) (PID) 控制算法控制无人机飞行。P 比例或 K 增益，增大此值可提高响应速度，但是过大会出现超调和/或振荡；I (积分) 增益，用于减少稳态误差。如果此值过低，响应可能永远无法达到设定点，如果此值过高，可能会出现缓慢振荡；D (微分) 增益，增大此值可抑制超调和振荡，仅按需增大此值，因为它会放大噪声，导致电机发热。

PID 调参的目标是设置 P/I/D 值，使“响应”曲线尽可能接近“设定点”曲线 (即快速响应且无超调)。PID

控制器是分层的，最底层的控制器是速率控制器，其次是姿态控制器，最后是速度与位置控制器。PID 调参应该按照这个顺序进行，从速率控制器开始，因为它会影响所有其他控制器。每个控制器 (速率、姿态、速度/位置) 和轴 (偏航、横滚、俯仰) 的测试过程都是相同的：通过快速移动摇杆来快速改变设定点，并观察响应。然后调整滑块 (如下所述)，以改善响应与设定点的跟踪效果，直到“响应”曲线尽可能接近“设定点”曲线。

### 2.4 RTK 设置和连接

RTK 模块正确连接飞控后 (一般连接飞控的 GPS2 端口)，还需要配套的遥控器和地面站才能正常工作。遥控器需要支持蓝牙功能，其接收器同步集成数传模块，以向飞控传送 RTK 差分信号。差分信号可以通过购买服务的方式得到，其账号信息在改装后的地面站软件设置，软件再安装到手机上，而手机通过蓝牙连接遥控器。当所有的连接畅通后，RTK 差分信号实时地通过蓝牙传输到遥控器上，再通过数传模块传输到飞控中，最后在 RTK 模块中解算出厘米级精度的定位数据并回传给飞控，用于无人机的控制和飞行。

### 3 软件安装与配置

软件系统包括遥控器端软件和飞行器端软件。遥控器端软件主要是手机地面站和视频显示等软件。飞行器端软件包括飞控固件和机载电脑软件，飞控固件通过地面站软件 qGroundControl 下载安装，然后进行设置和校准。机载电脑 Jetson Orin nano 的操作系统是一个定制的 ubuntu 系统，不一定兼容 x86 处理器的软件；有些软件可以直接安装，如 ROS noetic 版本和配套的软件包，但是有些软件，如 Open CV 软件包则需要从源码编译安装，才能利用机载电脑的 GPU 计算能力。深度相机的驱动程序可能也需要从源码安装，才能正确驱动相机。

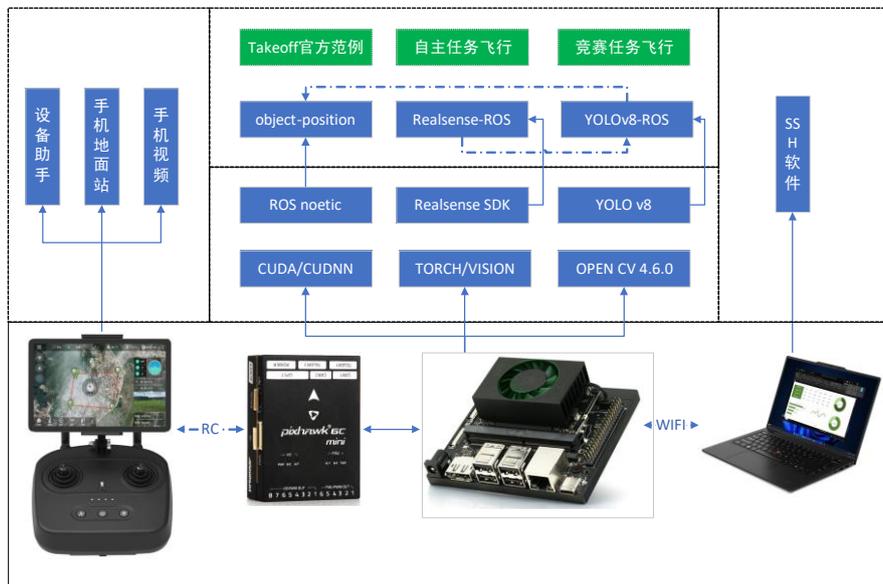


图 2 软件安装和设置示意图

如图 2 所示，需要安装多个软件，包括 ubuntu20 定制版 (Jetpack 5.1.1, L4T 35.3.1)，CUDA11.4 及对应的 CUDNN，Open CV 4.6.0 (源码下载后本地编译安装)，ROS noetic, pytorch, torchvision (源码下载后本地编译安装)，Realsense SDK (源码下载后本地编译安装，保险起见再命令行安装一下)，YOLO v8 (源码安装和命令行安装都可以)。

软件安装完成后，下载开源的深度相机 ROS 功能包并编译运行，将图像和深度数据以话题的方式发布出来；再下载 YOLOv8 的 ROS 功能包并编译运行，将目标识别结果以话题的方式发布出来。最后在 ROS 环境下，集成深度相机的图像和深度数据功能、YOLOv8 的目标识别功能，计算出识别目标的位置坐标并发布出来。这样软件开发环境就准备好了，可以进行面向竞赛的程序设计和开发。

在软件开发的同时，还需要拍摄目标的影像数据并进行标注，然后将标注结果数据集送入 YOLOv8 进行训练，得到目标权重数据集，供后续功能测试和竞赛使用。

#### 4 编程与算法实现

编程包括实现无人机仿真飞行、目标发现与定位和目标逼近与抛投，后面两个环节是多传感器循环协同的过程，是项目的重点和难点。

##### 4.1 基于大模型的无人机编程

项目涉及的编程内容专业性强，环节多，对于只学过 C 语言的很多同学来说是很大的挑战。因此，在教学中引入 DeepSeek 大模型辅助同学编程，让他们从 Pixhawk 官方范例开始，从简单到复杂，一步步实现项目要求的功能。

表 1 AI 逐步进阶编程提示

序号	功能要求	AI 编程提示
1	基础飞行	ros noetic c++ px4 offboard 自动起飞，升高到 2m，确认到达目标点后，再向前飞 3m，确认到达目标点后，返航，自动降落 auto land
2	基础飞行+抛投	ros noetic c++ px4 offboard 自动起飞，升高到 2m，确认到达目标点后，再向前飞 3m，确认到达目标点后，打开舵机，确认打开后，返航，自动降落 auto land
3	基础飞行+yolo 识别+抛投	ros noetic c++ px4 offboard ，初始化，订阅/object_position 话题，然后自动起飞，升高到 2m，确认到达目标点后，再向前飞 3m，确认到达目标点后，如果发现目标，则飞行到目标正上方，等待 2s，然后打开舵机，确认打开后，返航，自动降落 auto.land

无人机的飞控为 Pixhawk 6c (固件版本: 1.13.3)，机载电脑选型为 Jetson Orin nano 8g，其对应的操作系统为 ubuntu20.04，则配套的 ROS 版本为 ROS1 (noetic)，这就是程序编写和运行的环境，后面大模型辅助编程提示必须明确这个环境，否则自动编写的代码不可用。在同学重现并熟悉官方范例后，就可以按照设计的 AI 编程提示进行编程 (表 1)，在仿真环境下测试通过后，再部署到真

机上运行。通过这个过程，让同学们掌握大模型辅助编程的要领，后续自主使用大模型辅助编程。

##### 4.2 目标发现与定位

无人机负载的准确抛投是一个多传感器循环协同的控制过程，包括飞行控制器、机载电脑、深度相机和抛投器等。飞行控制器连接 RTK，实时接收高精度的位置信息，确保无人机飞行稳定，同时接收机载电脑发布的飞行指令飞向目标。机载电脑的系统是 ubuntu 20.04，ROS 版本是 noetic。在 ROS 环境下，运行多个功能包，深度相机 Realsense\_ros, YOLO\_v8\_ros, object\_position, MAVROS (负责与 PX 6C 飞控通信)，以及执行任务的 mission 功能包，他们通过 ros 话题和服务协同工作，完成任务。Realsense\_ros 功能包以一定频率 (如 15 帧/s) 拍摄和发布地面图像和深度信息，通过话题发布出来；而 YOLO\_v8\_ros 订阅图像话题，识别目标，将识别结果发布出来；object\_position 订阅深度信息话题和识别结果话题，将深度信息与识别结果图片对齐，将目标的中心点坐标发布出来。

发布的坐标是 RGB 坐标系下的坐标，需要根据这个坐标计算出目标中心点在无人机惯性坐标系下面的坐标。设目标中心点坐标为 (tx, ty)，由于相机朝下安装，则 tx 的正方向朝右，与机体坐标系 y 方向平行，ty 正方向朝前，与机体坐标系 x 方向平行。再设舵机抛投的位置 (水瓶落下的位置) 与机体坐标系原点的 x, y 方向分别偏离 a, b 的距离，深度相机的 RGB 镜头安装位置与机体坐标系原点的 x, y 方向分别偏离 A, B 的距离，则 dAa=A-a, dBb=B-b，它们分别为 RGB 镜头到达目标正上方后，需要向后、向左移动的距离。在无人机惯性坐标系下，设机头方向角为  $\theta$ ，当检测到目标时，目标中心点在惯性坐标系的 x, y 方向的坐标增量分别是：

$$g_{dx} = (ty - dAa) \cos \theta + (tx - dBb) \sin \theta$$

$$g_{dy} = (ty - dAa) \sin \theta + (tx - dBb) \cos \theta$$

目标中心点在惯性坐标系下面的坐标为无人机的实时坐标加上对应的坐标分量。

目标中心点惯性坐标的计算是一个循环迭代的过程，当无人机发现目标后，就开始了计算，但是同一个目标的计算结果彼此应该很接近，如果发现异常结果，应及时剔除，以免影响后续的投放环节。

##### 4.3 目标逼近与抛投

目标识别和定位是在惯性坐标系下面飞机按照期望坐标导航并计算目标的惯性坐标的过程，而目标逼近飞机按照目标惯性坐标飞到目标上方后，切换到机体坐标系下面，使用速度控制的方式逼近目标正上方。当无人机准确到达后，目标在其深度相机 RGB 坐标系下面的坐标应该是 (-dAa, -dBb)，此时即可打开舵机，抛投负载。需要注意的是，由于飞机定位、相机采样频率和照片质量，以及 YOLO 算法识别的误差等因素，可能出现短时间突然

识别不到目标等意外情况,这些意外情况一定要及时处理,否则可能导致任务失败。

### 5 竞赛与实验教学效果

项目对标某大学生比赛中的四旋翼无人机负重飞行赛项,2023年10月启动,当年开发出样机并试飞成功,定位达到厘米级精度。2024年春季学期,基于样机设计了赛课一体无人机综合项目实训,同学们反映热烈,非常欢迎。当年暑假,选拔了2组参训的同学参加了上述赛项,都取得了较好的成绩,分别是南部赛区二等奖和决赛三等奖。比赛完成后,任课老师使用竞赛成果对实训项目进行丰富和优化,并应用到2025年春季学期的实训教学中,并指导参训同学参加2025年度同类型赛事,取得了一定的突破,飞机可以在竞赛中将负载投入到最小目标圆筒中,取得了更好的成绩。这些竞赛成果整理总结后,可以应用到下一届参训学生中去,实现了实训促进竞赛水平的提高,竞赛成果又反哺实训的良好循环。

### 6 结论与展望

本文设计和开发了一种高精度的自主抛投自主四旋翼无人机,它集成了机载电脑、深度相机、YOLOv8、RTK等技术,能够高精度地识别定位目标,导航到目标上空并抛投物体,达到比赛要求的功能。平台一方面用于参赛同学的培训,提高他们的技术水平和效率,提高了参赛成绩;另一方面应用于大范围的实训教学,将竞赛资源普惠于所有参加实训的学生,让更多的学生了解和掌握人工智能及无人机技术,提高了他们的自主学习能力和创新能力,增加他们参加相关赛事的机会。

基金项目:深圳市教育科学“十四五”规划2024年度研究项目(zdzz24015),中山大学2025年度校级教学质量工程项目,中山大学大学生创新创业项目(20250891)。

#### [参考文献]

[1]陈金林,吴一全,苑玉彬.无人机视角下目标检测的YOLO系列算法研究进展[J].北京航空航天大学学

报,2024(8):1-34.

[2]龚循强,张方泽,鲁铁定,等.新工科背景下“人工智能+无人机测绘”实验教学改革探讨[J].东华理工大学学报(社会科学版),2020,39(2):193-196.

[3]邱玉婷,崔剑,马鹏举,等.多学科交叉融合的无人机实践教学方案设计[J].实验技术与管理,2020,37(12):175-178.

[4]张子明,王从庆,刘良勇,等.基于ROS的旋翼无人机实验教学平台设计[J].电子设计工程,2022,30(22):34-39.

[5]曹芸芸.基于Raspberry Pi及Drone Kit的无人机飞行控制教学实践应用[J].微型电脑应用,2024,40(5):243-246.

[6]李位星,王大东,葛声扬,等.基于STM32的四旋翼无人机实验教学平台[J].实验技术与管理,2021,38(2):91-94.

[7]王清华,胡永兵,李迎松.基于四旋翼无人机的嵌入式系统实践教学设计与探索[J].实验室研究与探索,2024,43(3):199-203.

[8]王星捷,杜华,袁伟强.倾斜摄影测量教学无人机的设计与应用[J].实验室研究与探索,2021,40(10):227-231.

[9]温凯,陈缪.全尺寸四旋翼无人机教学平台设计与课程开发[J].实验技术与管理,2018,35(9):100-103.

[10]王安成,李建胜,郭雨岩,等.无人机技术与应用课程实践教学模式探索与实践[J].测绘通报,2022(1):119-122.

[11]汪玉美,刘楠楠,冯娟娟,等.无人机实验仿真教学平台设计与应用[J].实验室研究与探索,2023,42(5):143-148.

[12]刘佳,杨锐,刘汉奎,等.新工科背景下无人机方向工程人才培养实践探索[J].民航学报,2023,7(6):142-145.

[13]郭晶晶,刘允刚,满永超,等.自主多旋翼无人机系统:感知、规划与控制[J].控制理论与应用,2024,41(10):1707-1725.

[14]段海滨,王壮壮,霍梦真,等.带爪无人机自主控制技术新进展[J].中国科学:技术科学,2024,54(8):1533-1548.

作者简介:胡继华(1971.3—),男,河南信阳人,博士,高级实验师,主要研究方向为无人机实训教学和实验室管理。