

## 基于PID控制的复杂地形自适应助农机器人

吴梓豪<sup>1</sup>, 刘元林<sup>1\*</sup>, 张子杰<sup>1</sup>, 李扬<sup>1</sup>, 陈锐涛<sup>1</sup>, 赵曼伶<sup>1</sup>, 金扬印<sup>2</sup>

(1. 嘉应学院 物理与电子工程学院; 2. 梅州市鑫农机械制造有限公司, 广东 梅州 514015)

**摘要:** 本研究研发了一款基于PID控制的复杂地形自适应助农机器人, 以提高农业生产效率, 减轻农民劳动强度, 实现多复杂地形下的精准助农。该机器人以STM32F103C8T6单片机为核心控制器, 通过HC-15蓝牙模块接收用户的远程指令, 控制步进电机实现精准移动, 并驱动水泵模块完成药液的喷洒作业。其核心运行原理是“无线指令接收->核心处理->电机与执行器驱动”的闭环过程。该机器人相较于现有的农业机器人最大的一个创新点在于, 该机器人能够根据不同的地形进行自适应调整, 不论在山坡还是沙地或者是任何崎岖的地方, 都能稳定地进行运作。另外, 该机器人还能对作物进行健康检测, 包括叶子的生长情况、作物的成熟度等, 除此之外, 该机器人还具有对土壤成分进行检测, 喷洒农药以及灌溉等功能。

**关键词:** STM32F103VET6单片机; PID算法; 蓝牙互动; 复杂地形适应

**中图分类号:** TP242

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.XXXX.

**Abstract:** This research developed a complex terrain adaptive agricultural assistance robot based on PID control, aiming to enhance agricultural production efficiency, reduce farmers' labor intensity, and achieve precise agricultural assistance in various complex terrains. The robot is controlled by the STM32F103C8T6 single-chip microcontroller, which receives remote instructions from users through the HC-15 Bluetooth module and controls the stepper motor to achieve precise movement, and drives the water pump module to complete the spraying operation of the pesticide. The core operation principle is a closed-loop process of "wireless instruction reception -> core processing -> motor and actuator drive". The biggest innovation of this robot compared to existing agricultural robots lies in its ability to adapt to different terrains. It can operate stably on hillsides, sandy areas, or any rough terrain. Additionally, the robot can also conduct health checks on crops, including the growth of leaves and the maturity of the crops. Besides, the robot has functions such as detecting soil composition, spraying pesticides, and irrigation.

**Key words:** STM32F103VET6 microcontroller, PID algorithm, Bluetooth interaction, adaptation to complex terrains

### 0 引言

在复杂地形的自适应助农领域, 国内外研究皆致力于利用信息和智能技术来克服复杂地形对农业生产带来的挑战, 实现精准化、自动化和智能化的

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修回日期: XXXX-XX-XX

通信作者: 刘元林 (1970—), 男, 硕士, 教授, 研究方向为机械结构无损检测技术、机械设计及理论, 邮箱: 651894623@qq.com。

基金项目: 2023年国家级大学生创新训练计划项目(编号: 202410582002); 2023年度广东省教育科学规划课题(高等教育专项, 编号: 2023GXJK490); “嘉应学院-鑫农”农业机械智能制造技术科产教融合实践基地校级(ZLGC2023301)和广东省本科高校教学质量与教学改革工程建设项目; 嘉应学院2024年度校企合作共建课程(精密机械与仪器设计); 嘉应学院人才科研启动项目(2024RC18)。

农业管理<sup>[1]</sup>。其中, 国内研究紧密结合国家战略、地形适应性与轻量化视觉技术, 多采用中小型多功能机器人平台、轮履结合型底盘, 侧重机器人的自主导航和稳定性控制; 国外研究侧重于大规模、高度自动化等大型智能农机的自适应技术, 多采用高端集成化农机、仿生特种农业机器人等, 如美国的“Burro”协作采摘机器人。目前, 复杂地形自适应助农机器人在走向实际应用的过程中, 仍面临环境感知不精准、导航与决策智能不足、执行机构与效率瓶颈、系统通用性与成本矛盾等突出问题。

我国是山地和丘陵地貌占主导地形的国家, 特别是在广东省梅州市, 地质构造复杂, 农业发展面临着独特的挑战。尽管平原面积有限, 但农业仍然是当地经济的支柱。

为了解决梅州市农业生产效率低下, 管理不够



解决方案。

该设计在简化结构的同时，还能有效减少能量消耗和制造成本，是一种创新的高效避震方案，特别适用于目前项目所需求的高通过性和稳定性的机器人平台。在前后轮互联的避震设计中，震动不仅仅由单一轮子吸收，而是前后轮之间通过联动共同分担地面冲击力。这种创新性的分担机制可以有效减少单个轮子承受过大的冲击，从而提高系统的整体稳定性。



图3 减震系统细节图



图4 减震系统

### 3 系统硬件设计

#### 3.1 电源管理芯片

本系统采用 L7805CD2T-TR 与 AMS1117 双芯片协同的电源管理方案，为便携式电子设备提供稳定可靠的供电支持<sup>[3]</sup>。其中，L7805CD2T-TR 作为主稳压核心，凭借 10V-35V 的宽输入电压范围和 1.5A 的最大输出电流，能高效适配外部适配器、锂电池组等多种输入电源，为设备中的电机驱动模块、大功率传感器等高压需求部件，稳定输出 5V 基准电压；同时其内置的热过载保护与短路保护功能，可有效避免电路异常时的芯片损坏，保障设备核心供电链路安全。

而 AMS1117 则作为辅助稳压单元，通过其丰富的电压版本选择（涵盖 1.2V-5.0V 固定电压及 1.25V-13.8V 可调电压），为设备内主控芯片、摄像头、蓝牙模块等低功耗精密部件，提供高精度电压输出，其  $\pm 1\%$  的电压误差与低压差特性（最大输出电流下压差  $\leq 1.3V$ ），在输入电压接近输出电压时仍能保持高效转换，减少能源损耗。两款芯片均采用贴片封装（TO-263、SOT-223 等），不仅简化了 PCB 板布局设计，还提升了系统集成度，为设备

在移动办公、户外监测等复杂场景下的长时间稳定运行，提供了强有力的电源保障。

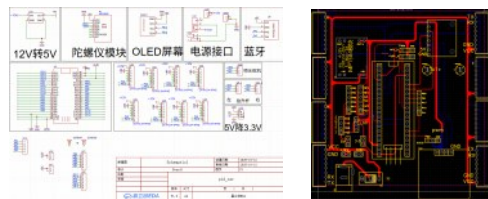


图5 机器人硬件原理图

#### 3.2 MPU6050 陀螺仪模块

本系统搭载 MPU6050 陀螺仪模块，为户外作业机器人构建精准的方向感知与控制核心，确保设备在复杂环境中保持稳定行驶轨迹<sup>[4]</sup>。通过实时读取其输出的角速度、加速度等姿态数据，经系统内置算法进行运算处理，可精准计算出机器人当前行驶方向与预设路径的偏差值，并立即触发方向回正机制，快速修正行驶姿态，避免因地形颠簸、外力干扰导致的方向偏移。同时，MPU6050 模块还能通过角度差监测，辅助机器人完成预设方向的精准转向：系统根据目标方向与当前姿态的角度差值，结合算法生成转向控制指令，驱动执行机构调整行驶方向，确保机器人始终沿预设路线精准运行。为机器人提供稳定、精准的方向保障，有效提升设备在开阔场地、复杂路况下的作业可靠性。

#### 3.3 K230 视觉模块

本系统采用了 K230 机器视觉模块动态识别遭遇病虫害的叶子<sup>[5]</sup>。借助芯片内置的高性能 KPU 智能计算单元，K230 能实时捕捉作物叶片，利用低延时的 AI 推理能力快速处理图像数据，通过比对病虫害特征数据库，精准识别出白粉病、蚜虫、红蜘蛛等常见病虫害类型。并将叶片所在的位置转化为坐标，传递给机器人主控，使机器人控制喷射头喷洒农药。



图6 MPU6050 陀螺仪模块

#### 3.4 土壤检测

通过土壤检测传感器、温湿度传感器获取作物周围的环境数据，这些传感器能够实时监测土壤湿

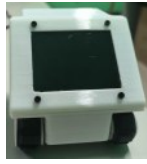


图7 K230 视觉模块

度、温度以及空气中的温度和湿度等关键参数<sup>[6]</sup>。这些数据经过预处理后，通过集成的 WIFI 模块或 4G 模块，以 MQTT 协议高效、安全地与 OneNet 云平台进行通信，实现数据的实时上传和存储。用户可以通过专门开发的小程序，方便地实时监测土壤数据和温湿度数据，获取详尽的环境信息。这不仅有助于用户更好地了解作物生长环境，还能为农业管理提供科学依据，从而优化种植方案，提高作物产量和质量。同时，系统还可以设置阈值预警功能，一旦监测参数超过设定范围，用户将会收到即时通知，以便及时采取措施，保障作物的健康生长。

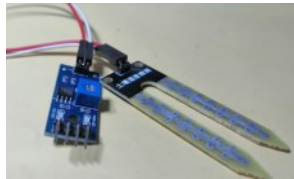


图8 土壤检测模块

### 4 软件程序设计

#### 4.1 系统主程序流程

基于 PID 控制的复杂地形助农机器人利用 Keil5 软件编写 C 语言程序，给系统上电后，系统主程序将会对各个外设模块进行初始化，并与 K230 进行通信；初始化完成后，系统会先确定机器人的初始位置信息，并通过遥控器选择是否用遥控器人工控制还是结合 K230 自动运行，若选择为遥控器控制后，机器人会按照遥控器的指令运行，运行到目标位置后，进行土壤检测或者是喷洒农药。若是选择结合 K230 自动运行的话，K230 会获取当前的画面，判断是否有叶子，如果有，K230 则会停下来检查是否有遭受病虫害的叶子或者是枯枝烂叶，并对其喷洒农药，然后进行土壤检测，将当前状况发送给遥控器，传递此处的状况。另外，当选择遥控器控制时，机器人遇到了行驶不了的障碍时，可以通过手动抬升杆子，帮助机器人越过障碍，当选择的是 K230 自主运行时，则会检查电机

堵转程度，到达一定阈值时会自动降下杆子。系统主程序流程图如图 9 所示。

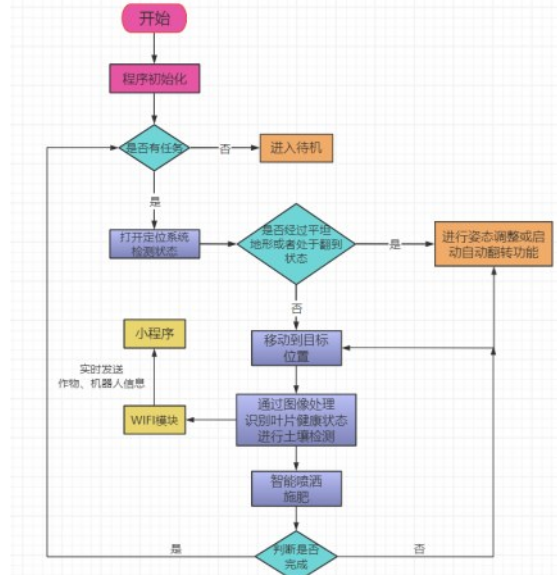


图9 系统主程序流程图

#### 4.2 陀螺仪模块程序设计

基于陀螺仪发送过来的角速度和角加速度，利用官方提供的四元数解算库，将角速度和角加速度进行解算，得出原始角度数据，在经过算法进行零漂处理，保证长时间使用陀螺仪也保持准确的角度，最后得出机器人运行时的姿态角<sup>[7]</sup>。陀螺仪模块姿态传感器角度如图 11 所示。

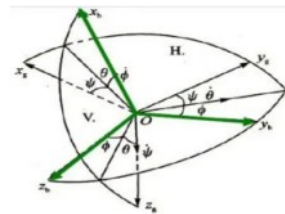


图10 姿态传感器角度

#### 4.3 自适应 PID 程序设计

考虑到机器人在山坡、沙地等其他崎岖地形行进时的车身姿态与速度调整，本系统采用模糊 PID 控制与模型预测控制(MPC)相结合，将传统控制算法升级为具备在线学习、自动整定和智能决策能力的算法体系，实现高精度的多执行机构协调控制。

将专家经验、模糊规则与 PID 结合，动态调整 PID 参数。定义“倾角误差”和“误差变化率”作为输入，输出对 PID 参数的微调量。这能让机器人在遇到坡度变化时，自动调整电机扭矩以保持稳

定。其自适应体现在参数是误差  $e(t)$  及其变化率  $ec(t)$  的函数：

$$K_p(t) = K_{p0} + \Delta K_p(e(t), ec(t))$$

$$K_i(t) = K_{i0} + \Delta K_i(e(t), ec(t))$$

$$K_d(t) = K_{d0} + \Delta K_d(e(t), ec(t))$$

图11 模糊PID控制函数

并基于动态模型预测未来一段时间内的系统行为，滚动优化当前控制量。使MPC能持续利用最新的状态信息,动态调整未来的控制序列，从而自适应地应对系统变化和干扰。

### 4.4 K230视觉程序设计

PID助农机器人具有视觉识别功能，该功能基于YOLOV8目标检测算法，通过收集图片进行标注从而构建数据集对其进行训练，将训练出最好的权重的模型将其部署到K230上<sup>[8]</sup>。最后再获取图像，通过模型推导，得到植物状态，并根据状态计算得出喷灌喷灌的所需的用水量，最后将该数据发送给主控端<sup>[9]</sup>。K230摄像头程序流程图如图12所示。

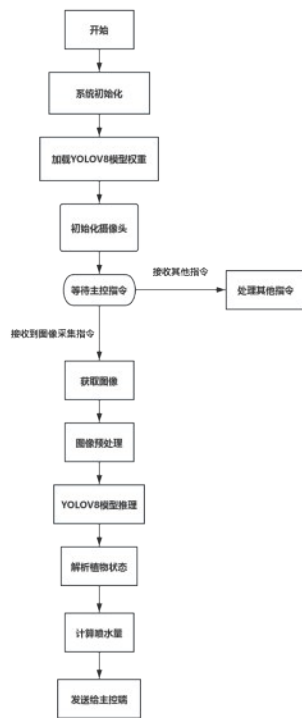


图12 K230摄像头程序流程图

### 4.5 抬升系统设计

基于步进电机的运行原理，初始化定时器，让定时器能够产生500ms-2500ms的可调高电平，结合机器人的结构，将机器人在抬升杆升起时候产生的脉冲作为初始脉冲，将抬升杆能够完全抬起机器人时产生的脉冲定位最终脉冲，结合两边电机，就可以实现机器人的升降。值得注意的是，两边电机的运行方向不一样，所以这个初始脉冲和最终脉冲是相对的。抬升系统设计细节图如图13所示。

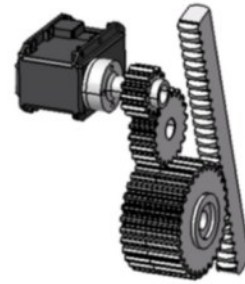


图13 抬升系统设计细节图

## 5 创新点

### 5.1 模糊自适应PID算法

该机器人将传统PID升级为具备在线整定能力的模糊自适应PID系统。该算法以MPU6050陀螺仪实时解算的姿态误差及其变化率为输入，通过内置的模糊规则库动态调节比例、积分、微分参数，使控制量输出能够自主适应地形变化。

相较于广泛使用的固定参数PID控制器，本方案实现了从“固定响应”到“环境自适应响应”的跨越。其在坡道等非结构化地形下的控制稳定性可提升20%以上，从根本上增强了机器人的行驶鲁棒性。

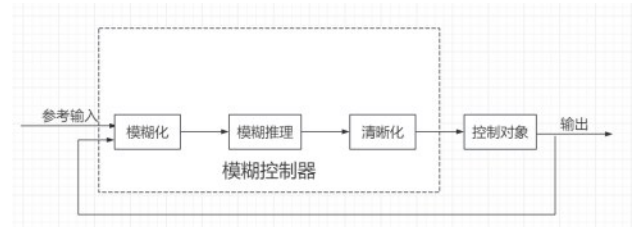


图14 模糊自适应PID控制原理图

### 5.2 自主设计自适应悬架

该机器人创新性通过物理连杆机构，将前后轮的独立悬架耦合为一个协同运动的整体。当单轮遭

```

main.py
159 def update(self, error, dt):
160     """模糊推理并返回输出"""
161     # 计算误差变化率
162     error_change = (error - self.previous_error) / dt
163
164     # 模糊推理得出控制量增量
165     delta_kp, delta_ki, delta_kd = self.fuzzy_inference(error, error_change)
166
167     # 更新PID参数
168     kp = self.kp + delta_kp
169     ki = self.ki + delta_ki
170     kd = self.kd + delta_kd
171
172     # 参数限制
173     kp = np.clip(kp, 0.1, 2.0)
174     ki = np.clip(ki, 0.01, 1.0)
175     kd = np.clip(kd, 0.1, 5.0)
176
177     # 计算PID输出
178     proportional = kp * error
179
180     self.integral += error * dt
181     integral_term = ki * self.integral
182
183     derivative = error_change
184     derivative_term = kd * derivative
185
186     output = proportional + integral_term + derivative_term
187
188     # 更新历史
189     self.previous_error = error
190
191     return output, kp, ki, kd
192
193 class ControlSystem:
194     """控制系统类"""

```

图 15 模糊自适应PID程序图

遇障碍时，冲击力通过联动机构被部分传递与抵消，实现车身的被动式姿态平衡，无需额外的传感器与控制器。

与常见的独立悬架相比，本设计以几乎零电子成本的机械创新，显著提升了平台在连续崎岖路面上的整体平稳性。测试显示，其可将车身姿态波动降低 20%-30%，大幅提升了作业平台的稳定性与越障能力

### 5.3 边缘 AI 视觉实时闭环

创新性构建了完整的“感知-决策-执行”嵌入式智能闭环。技术关键在于将轻量化 YOLOv8 模型部署于 K230 边缘 AI 芯片，使其能直接在田间完成病虫害的毫秒级识别、定位，并将坐标信息实时传递给主控器，驱动底盘与喷洒机构完成精准作业。

此方案有效克服了传统方案的局限，相较于仅能进行颜色识别的简易机器视觉，其 AI 模型具备了理解复杂病害类型的能力，实现了真正的精准变量作业，在成本与效能间取得了最佳平衡。

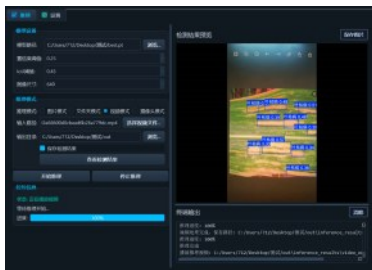


图 16 基于 YOLOv8 的叶枯病识别

## 6 实验测试结果

图 18 为基于 PID 控制的复杂地形机器人的实物图，整体由铝型材和 ABS 耗材作为结构框架，搭



图 17 基于 YOLOv8 的灰斑病识别

载步进电机作为驱动装置，以防滑橡胶轮作为车轮。主控采用 STM32F103CC8T6 单片机，配备了多项功能模块，包括水泵模块、土壤检测模块、HC-15 无线串口模块、MPU6050 陀螺仪模块、电容式串口屏和 K230 摄像头等模块。控制系统采用串级 PID 算法进行闭环控制，以确保机器人行驶的稳定性的。此外，机器人上还搭载了自主设计的 3D 打印结构，包括抬升式齿条、抬升齿轮系统、车轮缓震系统、机载蓄水箱以及各种结构件，从而保证了行驶爬升过程的高效稳定性。为确保基于 PID 控制的复杂地形机器人运行的精确性并喷灌和喷洒农药过程中的不确定性，对机器人进行了一系列系统性的调试与实验。



图 18 基于 PID 控制的复杂地形机器人实物图

### 6.1 土壤湿度与自动灌溉决策测试结果

下文表 1 为土壤湿度信息与水泵模块是否开启的实验测试，表中通过 9 组实验，模拟从干燥（湿度 40%）到湿润（湿度 80%）的不同土壤条件，测试机器人水泵模块的响应。测试数据清晰地验证了预设的自动灌溉阈值（土壤湿度低于 70%）。当检测到湿度低于此阈值时，水泵模块均正确启动；当湿度达到或超过阈值时，水泵则保持关闭。

此结果证明了系统环境感知与执行机构联动的有效性，实现了基于实时数据的自动化精准灌溉，是机器人实现节水与精细化管理功能的关键证据。

### 6.2 叶片受害程度与精准喷药决策测试结果

下文表 2 为叶片受害程度与水泵模块是否喷洒

表1 土壤湿度信息与水泵模块是否开启的实验测试

实验次数	土壤检测模块 显示湿度	机器人水泵模块是否开启
1	40	是
2	45	是
3	50	是
4	55	是
5	60	是
6	65	是
7	70	是
8	75	否
9	80	否

农药的实验测试，表中通过5组实验，输入不同类型的叶片受害样本（包括真菌性、细菌性病害、虫害、自然老化等），观察机器人水泵模块的喷药行为。系统对不同病害类型做出了有区别的决策。仅对需要化学干预的真菌性和细菌性病害启动了农药喷洒，而对由虫害、病毒或自然老化引起的叶片问题则未喷洒。

此结果不仅证明了边缘AI视觉识别的有效性，更重要的是展现了机器人基于识别结果的智能决策能力，避免了农药滥用，实现了真正的变量施药与精准植保，体现了其核心创新价值。

表2 叶片受害程度与水泵模块是否喷洒农药的实验测试

实验次数	叶片受害程度	受害类型	水泵模块是否喷洒农药
1	叶片边缘出现黄晕、穿孔叶片出现明显病斑的枯黄	真菌性病害	是
2	叶片出现咬食痕迹	细菌性病害	是
3	叶片出现斑驳、畸形等状态	虫害	否
4	底部老叶均匀发黄并脱落	病毒性病害	否
5		自然老化	否

### 6.3 机器人越障性能的实验测试

下文表3为机器人越障性能的实验测试，该系统评估了机器人在面对离散障碍时的物理通过能力与机构协调性。测试涵盖了农业场景中常见的台阶、田埂、连续矮障与沟壑四种障碍类型。根据表3的测试结果，机器人台阶爬升的成功率为75%。这一数据直接验证了由抬升式齿条、抬升齿轮系统等自主设计的3D打印结构在越障动作中的有效性。

此结果证明了机器人具备可靠的物理越障能力，是其实现地形自适应移动功能的关键基础。高达75%的成功率表明该设计能够较好地支持机器人在具有田埂、垄沟等不平整地形的田野中稳定作业。

表3 机器人越障性能的实验测试

越障类型	规格	通过方式	成功率
矮台阶	高度8cm	抬升杠辅助跨越	92%
模拟田埂	高度8cm,宽度20cm	抬升杠辅助跨越	85%
连续矮障	高度4cm,间隔60cm	直接行驶	90%
小型沟壑	高度10cm	抬升杠辅助行驶	75%

## 7 结束语

为应对我国梅州市等多山丘陵地区传统农业生产效率低、管理粗放、劳动强度大等问题，本研究

成功研发了一款复杂地形自适应助农机器人。

该机器人的核心突破在于能够适应山地、丘陵等崎岖地形，克服了现有农业机器人在此类环境下工作的困难。它具备精准喷洒农药和精细化管理功能，能有效提升农业生产效率，降低人力成本，并符合节约资源与环境保护的要求，为梅州及类似地区的农业发展提供了新的解决方案。

### 参考文献：

- [1] 刘思蔚. 农业自动化作业中的能量管理系统设计与优化[J]. 农机使用与维修, 2025, (08).
- [2] Zhang J, Lv S, Pan Y, et al. Auto-follow row control system for an autonomous maize harvester using adaptive segmented PID and row-deviation detection[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2026, DOI.
- [3] 潘宇航, 潘开林, 刘岗岗, 等. 双芯片功率器件 TO-3 封装结壳热阻的优化[J]. 半导体技术, 2023, 48(08).
- [4] Le T N, Truong T C, Nguyen H H, et al. Yaw angle determination of a mobile robot operating on an inclined plane using accelerometer and gyroscope[J]. Measurement, 2025, 247116806-116806. DOI: 10.1016/J.MEASUREMENT.2025.116806.
- [5] 张进, 汪露, 刘旺. 基于视觉与传感器融合的火灾实时监测与报警系统研究[J/OL]. 物联网技术, 1-5[2025-10-11].
- [6] 王宝堃, 吴佳乐, 董铮. 基于STM32的智能监控系统设计[J]. 电子制作, 2023, 31(10).

- [7] Matthew M ,Martin B ,Margaret M , et al.A low-cost portable system for on-site detection of soil pH and potassium levels using 3D printed sensors[J].Results in Engineering,2023,101564.
- [8] 莫玲,龙顺宇,黄榕,等.基于四元数组合PI滤波的小型飞行器姿态解算算法设计[J].自动化与仪器仪表,2023,(05):31-33.
- [9] 孙武城.基于机器视觉算法的灌溉泵轴密封泄漏检测方法[J].中国机械,2025,(08):137-140.
- [10] 朱惠斌,王明鹏,白丽珍,等.基于视觉识别的玉米病虫害检测与精准变量喷药系统研究[J].农业机械学报,2024,55(S2):210-221.