

基于PID控制的复杂地形自适应助农机器人

吴梓豪¹, 刘元林¹, 李扬¹, 张子杰¹, 陈锐涛¹, 赵曼伶¹, 金扬印²

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

摘要: 研发了一款基于比例-积分-微分控制 (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农药喷洒作业。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”的过程。该机器人相较于现有农业机器人最大的一个创新点在于, 能够根据不同的地形进行自适应调整, 不论是在山坡、沙地, 还是其他崎岖地形, 都能稳定运作。该机器人还能对作物进行健康检测, 包括叶片的生长情况、作物的成熟度等; 同时支持土壤成分检测、农药喷洒及灌溉等。

关键词: STM32F103C8T6 单片机; PID 算法; 蓝牙通信; 复杂地形自适应

中图分类号: TP242

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.WLW25199

PID control based complex terrain adaptive agricultural assistance robot

Wu Zihao¹, Liu Yuanlin¹, Li Yang¹, Zhang Zijie¹, Chen Ruitao¹, Zhao Manling¹, Jin Yangyin²

1. School of Physics and Electronic Engineering, Jiaying University, Meizhou 514015, China

2. Meizhou Xinnong Machinery Manufacturing Co., Ltd., Meizhou 514015, China

Abstract: A complex terrain adaptive agricultural assistance robot based on PID control was developed, aiming to enhance agricultural production efficiency, reduce farmers' labor intensity, and achieve precise agricultural assistance in various complex terrains. The robot was controlled by the STM32F103C8T6 single-chip microcontroller, which received remote instructions from users through the HC-15 bluetooth module and controlled the stepper motor to achieve precise movement, and drove the water pump module to complete the spraying operation of the pesticide. The core operation principle was a closed-loop process of “wireless instruction reception → core processing → motor and actuator drive”. The

收稿日期: 2025-12-15; 修回日期: 2026-06-03

通信作者: 刘元林, 651894623@qq.com

基金项目: 2023 年国家级大学生创新训练计划项目 (No. 202410582002); 2023 年度广东省教育科学规划课题专项 (No. 2023GXJK490); 2021 年广东省线下一流本科课程-精密机械与仪器设计项目 (No. 422A1002); 2023 年度广东省本科高校教学质量与教学改革工程项目 (No. 424A1603); 2024 年度广东省本科高校教学质量与教学改革工程项目 (No. 425A3201); 嘉应学院教学质量与教学改革工程项目 (No. ZLGC2023301); 2024 年度校企合作共建课程项目 (嘉院教〔2024〕39 号, No.16); 嘉应学院人才科研启动项目 (No. 2024RC18)

Foundation Items: The 2023 National College Students' Innovation Training Program Project (No. 202410582002), The 2023 Annual Project of Guangdong Province's Educational Scientific Research Planning (No. 2023GXJK490), The 2021 Annual Guangdong Province First-Class Undergraduate Courses-Precision Machinery and Instrument Design (No. 422A1002), The 2023 Annual Project for Teaching Quality and Teaching Reform of Undergraduate Universities in Guangdong Province (No. 424A1603), The 2024 Annual Project for Teaching Quality and Teaching Reform of Undergraduate Universities in Guangdong Province (No. 425A3201), The Jiaying University Quality Education and Teaching Reform Project (No. ZLGC2023301), The 2024 Annual Cooperative Course Construction between the School and Enterprises (Jiayuan Education [2024] No.39, No.16), The Jiaying University Talent Research Initiation Project (No. 2024RC18)

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 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: STM32F103C8T6 microcontroller, PID algorithm, Bluetooth communication, adaptation to complex terrain

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化和智能技术应对复杂地形给农业生产带来的挑战，实现精准化、自动化和智能化的农业管理^[1]。其中，国内研究紧密结合国家战略，聚焦地形适应性与轻量化视觉技术，多采用搭配轮履结合型底盘的中小型多功能机器人平台，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，仍存在环境感知不精准、导航与决策智能不足、执行机构作业效率受限、系统通用性与成本矛盾等突出问题。

我国国土以山地和丘陵为主，以广东省梅州市为例，当地地质构造复杂，农业发展面临着地形挑战。

为了解决梅州市农业生产效率低下、管理不够精细等痛点，本文结合国内外对复杂地形的助农研究成果，利用机器人的自主导航和高度自动化，研发了一款基于比例-积分-微分控制（PID）的复杂地形自适应助农机器人。该机器人相较于现有农业机器人最大的一个创新点在于，能够根据不同的地形进行自适应调整，在山坡、沙地等崎岖的地方，都能稳定运行。该助农机器人还能对作物进行健康检测，包括叶片的生长情况、作物的成熟度等。同时支持对土壤成分进行检测、喷洒农药以及灌溉等。

1 整体设计方案

本机器人系统以STM32F103C8T6微控制器为核心，搭建智能农业作业平台。系统集成多传感器硬件，包括：土壤检测模块用于实时监测环境参数，MPU6050模块提供姿态感知，K230人工智能

模块实现机器视觉识别。执行系统采用闭环步进电机驱动升降结构，配合水泵系统实现精准灌溉与施药作业。

通信系统通过HC-15蓝牙模块，支持移动终端远程监控，具备指令下发与数据上传功能。系统采用模块化设计，支持多种供电模式，具备完善的电源管理及防护功能。

该平台实现了农业生产中的智能感知、精准作业与远程管控一体化，显著提升作业效率与资源利用率。系统支持OTA升级与云平台对接，具有良好的扩展性与适应性，可广泛应用于现代农业种植场景。整体硬件框架如图1所示。

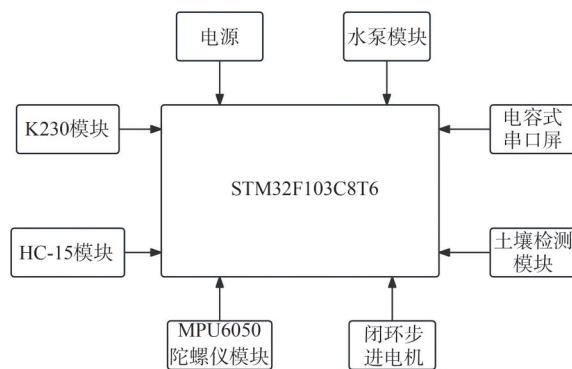


图1 整体硬件框架

2 机械结构设计

机器人的3D模型与数据如图2所示，整体尺寸约为600 mm×480 mm×380 mm，该机器人底盘采用8轮平台结构，主链接和子链接连接在一个轴上，子链接可以自由旋转。这种设计在保持高摩擦力的同时，确保在不同地面条件下的稳定行驶。结合PID控制算法精确控制每个轮子的动作，使机器人在复杂地形上平稳行驶^[2]。通过地面传感器、陀螺仪和加速度计等设备，实时监测地面情况和机器人的姿态。同时，通过传感器融合算法，动态补偿陀螺仪零偏，获得稳定可靠的实时姿态，以判断机器人是否翻倒。

该机器人采用前后互补关联的减振设计，前后

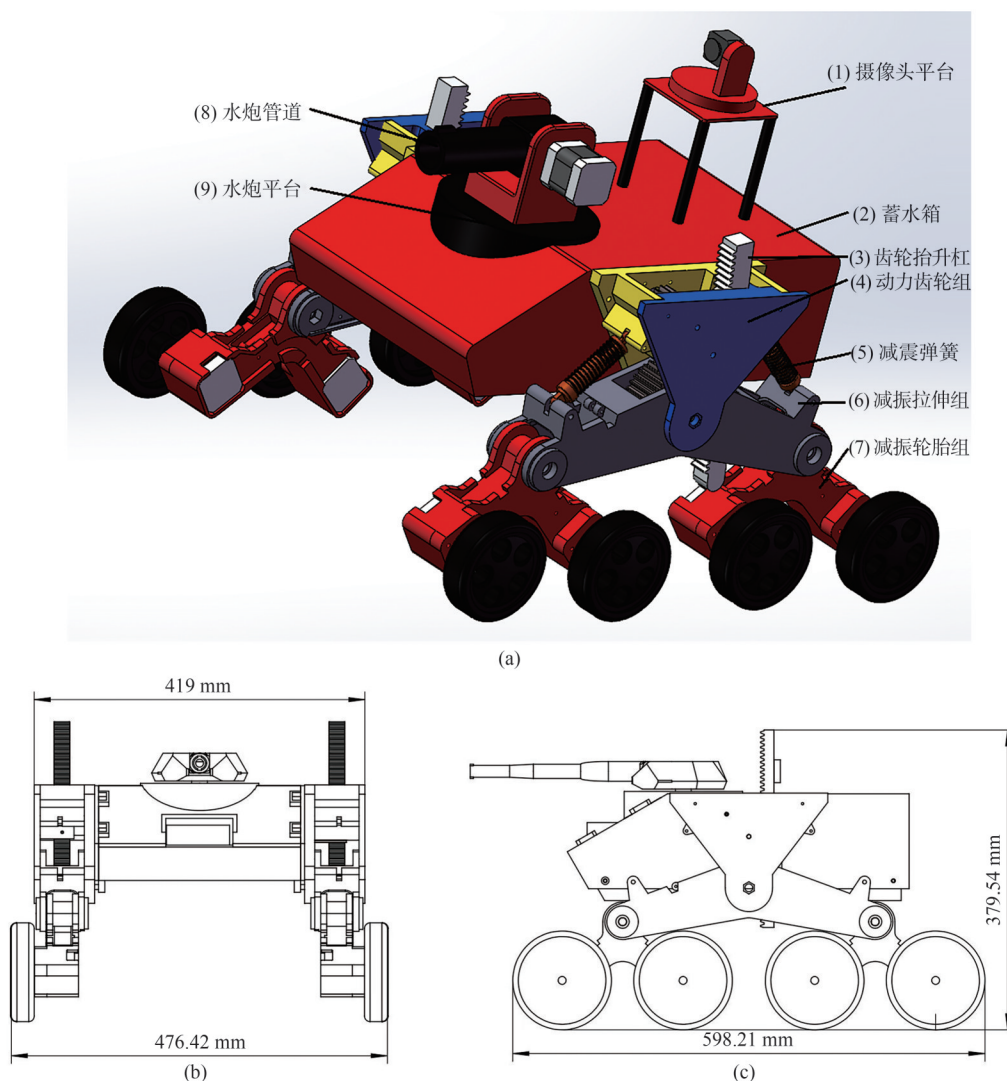


图2 机器人的3D模型与数据

轮的互联设计是关键。通过将前后轮的减振系统联动，可以在地面不平时实现前后轮同步调整振动吸收能力，而非单独依赖单个轮子的减振效果。该结构在越障过程中减少了前后轮不协调造成的过度振动，保持机器人运行平稳。前后轮互联的减振结构设计通过前后轮的协调作用，提供了比传统独立减振系统更优的减振效果。

该设计在简化结构的同时，可有效降低能耗和制造成本，特别适用于本研究对机器人平台高通过性和稳定性的设计需求。在前后轮互联的减振设计中，地面冲击力不是由单个轮子承载，而是前后轮之间通过联动共同分担。这种分担机制可以有效避免单个轮子承受过大的冲击，从而提高系统的整体稳定性。减振系统如图3所示。



图3 减振系统

3 系统硬件设计

3.1 电源管理模块

本系统采用 L7805CD2T-TR 与 AMS1117^[3] 双芯片协同工作的电源管理方案，为便携式电子设备提供稳定可靠的供电。其中，L7805CD2T-TR 芯片作为主稳压核心，凭借 10~35 V 的宽输入电压范围和 1.5 A 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、大功率传感器等稳定输出 5 V 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。

AMS1117作为辅助稳压单元，通过其丰富的电压版本选择（含 1.2~5.0 V 固定电压，1.25~13.8 V 可调电压），可为设备内主控芯片、摄像头、蓝牙模块等低功耗精密部件提供高精度电压输出。 $\pm 1\%$ 的电压误差与低压差特性（最大输出电流下压差 ≤ 1.3 V），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布局设计，还提升了系统集成度，为设备在户外监测等复杂场景下的长时间稳定运行提供可靠的电源保障。机器人硬件电路原理如图4所示。

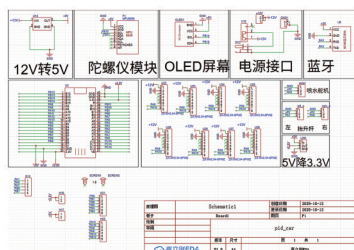


图4 机器人硬件电路原理

3.2 MPU6050陀螺仪模块

本系统搭载MPU6050陀螺仪模块，为户外作业机器人建立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^[4]。系统通过实时读取其输出的角速度、加速度等姿态数据，经内置算法运算，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，通过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。该模块为机器人提供稳定、精准的姿态感知，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

本文系统采用K230机器视觉模块动态识别存在病虫害的作物叶片^[5]。借助芯片内置的高性能神经网络

络硬件加速单元（KPU）智能计算单元，K230可实时捕捉作物叶片图像，利用低时延的人工智能（AI）推理能力快速处理图像数据，通过对比病虫害特征数据库，精准识别出白粉病、蚜虫、红蜘蛛等常见病虫害类型。同时将病害叶片所在位置转化为坐标信息发送给机器人主控，使机器人控制喷射头喷洒农药。MPU6050陀螺仪模块如图5所示，K230视觉模块如图6所示。

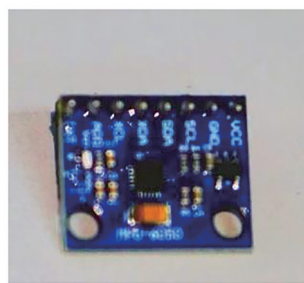


图5 MPU6050陀螺仪模块

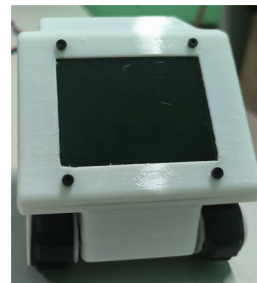


图6 K230视觉模块

3.4 土壤检测

系统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，可实时监测土壤温湿度以及空气温湿度等关键参数^[6]。这些数据经过预处理后，可通过集成的Wi-Fi模块或4G模块，基于MQTT协议与OneNet云平台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，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，一旦监测参数超过设定范围，用户会收到即时通知，以便及时采取措施，保障作物的正常生长。土壤检测模块如图7所示。

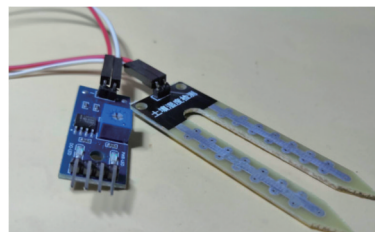


图7 土壤检测模块

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, 系统上电后主程序将对全部外设模块初始化, 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, 并通过遥控器选择人工遥控模式还是结合 K230 自主运行模式。若选择人工遥控模式, 机器人会按照遥控器的指令到目标位置, 进行土壤检测或喷洒农药; 若选择结合 K230 自主运行模式, K230 实时采集作物图像, 如存在病虫害的叶子或者烂叶, 对其喷洒农药, 然后进行土壤检测, 并将当前状况发送给遥控器。另外, 在人工遥控模式下, 如果机器人遇到无法行驶的障碍, 操作人员可以通过手动抬升杆子, 帮助机器人越过障碍。当选择 K230 自主运行模式时, 系统会检查电机堵转程度, 堵转量到达一定阈值时自动降下杆子。系统主程序流程如图 8 所示。

4.2 陀螺仪模块程序设计

基于陀螺仪发送的角速度和角加速度, 利用官方四元数解算库进行解算, 得出原始角度数据, 再

经过算法进行零漂处理, 保证长时间使用陀螺仪也能保持准确的角度, 最后得出机器人运行时的姿态角^[7]。陀螺仪模块姿态传感器角度如图 9 所示。

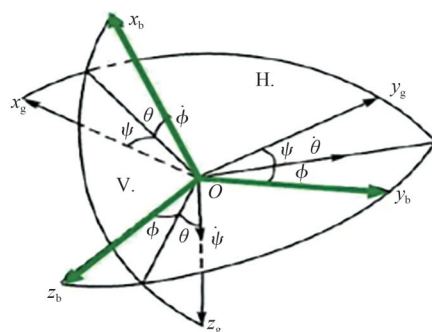


图9 姿态传感器角度

其中, x_s 、 y_s 、 z_s 表示导航坐标系/地球参考系的 3 个方向 (北方、东方和垂直向下指向地心), x_b 、 y_b 、 z_b 表示载体坐标系/机体坐标系的 3 个方向 (前-右-下); ψ 表示偏航角/航向角, θ 表示俯仰角, ϕ 表示滚转角/横滚角, $\dot{\psi}$ 表示偏航角速度 (即绕地球垂

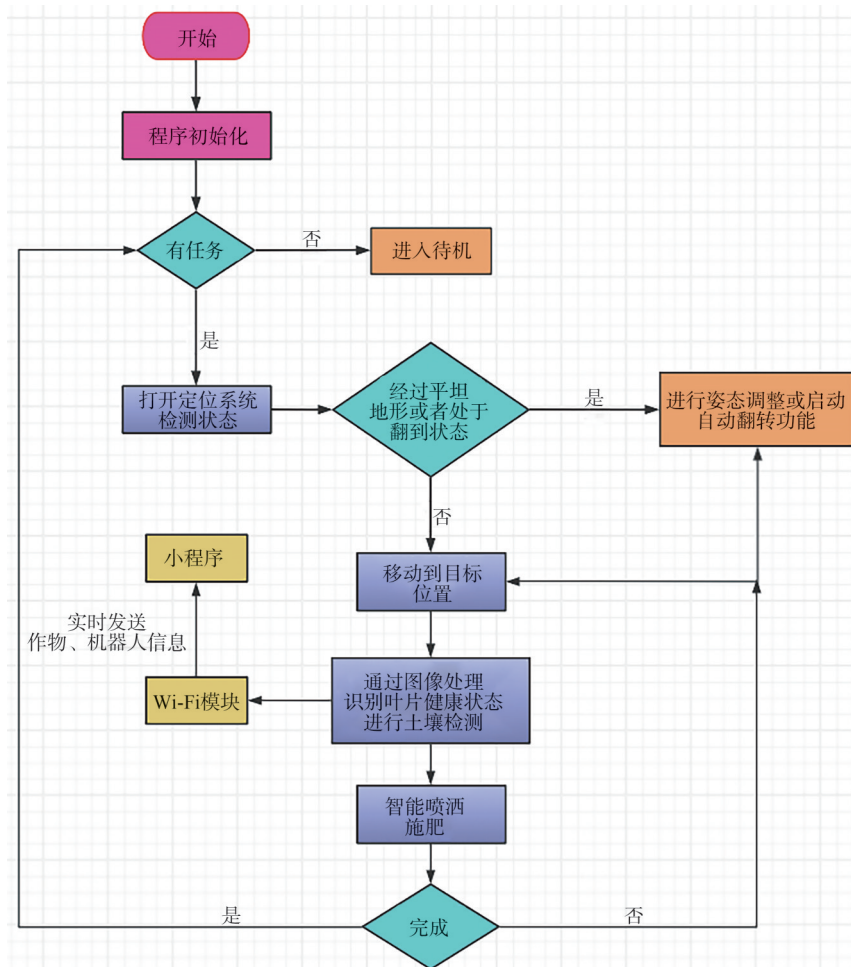


图8 系统主程序流程

直轴旋转的快慢)， $\dot{\theta}$ 表示俯仰角速度（即机头上下点头的快慢）， $\dot{\phi}$ 表示滚转角速度（即机体左右翻滚的快慢）。

4.3 自适应PID程序设计

考虑机器人在山坡、沙地等崎岖地形行进时对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）相结合的方式，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。

该算法将专家经验、模糊规则与PID结合，动态调整PID参数。算法定义“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。该算法的自适应体现为：参数是误差 $e(t)$ ，误差变化率 $ec(t)$ 的函数，实时参数更新计算关系如式(1)：

$$\begin{aligned} K_p(t) &= K_{p0} + \Delta K_p(e(t), ec(t)) \\ K_i(t) &= K_{i0} + \Delta K_i(e(t), ec(t)) \\ K_d(t) &= K_{d0} + \Delta K_d(e(t), ec(t)) \end{aligned} \quad (1)$$

其中， K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} （初始PID参数）是系统在理想或稳态情况下预先设定的PID基础值。 K_{p0} 表示基础比例系数（决定响应速度）， K_{i0} 表示基础积分系数（决定消除稳态误差的能力）， K_{d0} 表示基础微分系数（决定对趋势的抑制，即刹车能力）。 $\Delta K_p(e, ec)$ 、 $\Delta K_i(e, ec)$ 、 $\Delta K_d(e, ec)$ 为动态修正项，它们不是常数，是 $e(t)$ 和 $ec(t)$ 的二次函数。 K_p 、 K_i 、 K_d 是PID控制器最终实际使用的控制参数。 $e(t)$ 表示当前误差， $ec(t)$ 表示误差变化率。

同时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，训练出其中最好的权重模型部署到K230上^[8]。再获取图像，通过模型推导，得到植物病害状态，并根据病害程度计算得出喷药液量，最后将该数据发送给主控端^[9]。K230摄像头程序流程如图10所示。

4.5 抬升系统设计

基于步进电机的运行原理，系统初始化定时

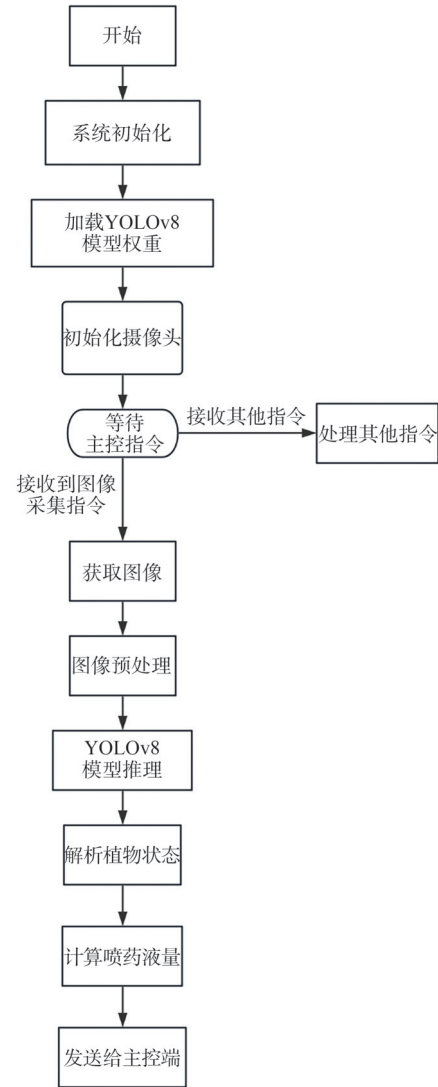


图10 K230摄像头程序流程

器，输出500~2 500 ms的可调高电平，结合机器人的结构，将机器人抬升杆启动脉冲作为初始脉冲，完全抬起时产生的脉冲作为最终脉冲，结合双侧电机，就可以实现机器人的升降。双侧电机的运行方向相反，所以初始脉冲和最终脉冲是相对的。

5 创新点

5.1 模糊自适应PID算法

本文系统将传统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。模糊自适应PID控制原理如图11所示。模糊自适应PID算法流程如图12所示。

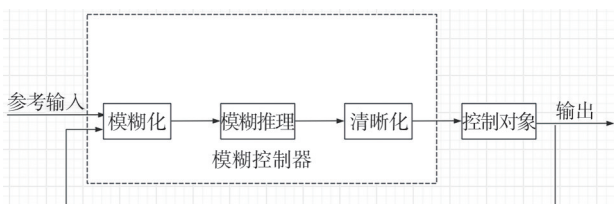


图11 模糊自适应PID控制原理

相较于广泛使用的固定参数PID控制器，本文方案实现了从“固定响应”到“环境自适应响应”的升级。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行驶的鲁棒性。

5.2 自主设计自适应悬架

本文机器人通过物理连杆机构，将前后轮的独立悬架耦合为协同运动的整体。当单轮遭遇障碍时，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，无须增设额外的传感器与控制器。

与常见的独立悬架相比，本文设计以几乎零电子成本的机械创新，显著提升了机器人在连续崎岖路面上的行驶平稳性。测试显示，机器人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

本文构建了完整的“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，芯片可直接在田间完成病虫害的毫秒级识别、定位，并将坐标信息实时发送给主控器，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，该AI模型具备识别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。基于YOLOv8的叶枯病识别效果如图13所示。基于YOLOv8的灰斑病识别效果如图14所示。

6 实验测试结果

基于PID控制的复杂地形机器人实物如图15所示，机器人由铝型材和3D打印件搭建结构框架，搭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STM32F103C8T6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。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^[10]。此外，机器

```

main.py
159 def update(self, error, dt):
160     """更新模糊PID控制器输出"""
161     # 计算误差变化率
162     error_change = (error - self.previous_error) / dt
163
164     # 模糊推理获取参数调整量
165     delta_kp, delta_ki, delta_kd = self.fuzzy_inference(error, error_change)
166
167     # 更新PID参数
168     kp = self.kp0 + delta_kp
169     ki = self.ki0 + delta_ki
170     kd = self.kd0 + 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     # 更新状态
189     self.previous_error = error
190
191     return output, kp, ki, kd
192
193 class ControlSystem:
194     """控制系统仿真"""

```

图12 模糊自适应PID算法流程



图13 基于YOLOv8的叶枯病识别效果

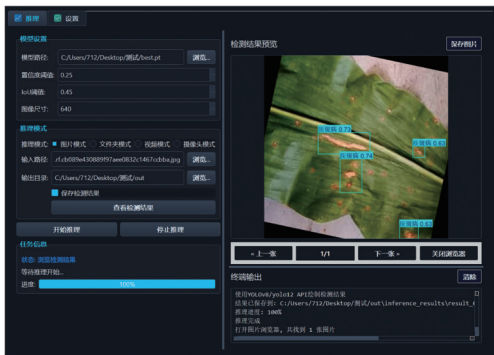


图14 基于YOLOv8的灰斑病识别效果



图15 基于PID控制的复杂地形机器人实物

人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性和稳定性。为确保基于PID控制的复杂地形机器人运行的精确性，降低喷灌和喷洒农药过程中的不确定性，本文对机器人进行了系统性的调试与实验。

6.1 土壤湿度与自动灌溉决策测试结果

土壤湿度与自动灌溉决策测试结果见表1，通过9组实验，模拟土壤从干燥（湿度40%）到湿润（湿度80%）的不同条件，测试机器人水泵模块的响应逻辑。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。

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	土壤湿度信息	水泵开启
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

该结果证明了系统环境感知与执行机构联动的有效性，通过实时数据实现自动化精准灌溉，完成节水与精细化管控。

6.2 叶片受害程度与精准喷药决策测试结果

叶片受害程度与精准喷施决策测试结果见表2，通过5组实验，输入不同类型的叶片受害样本（包括真菌性病害、细菌性病害、虫害、病毒性病害和自然老化），观察机器人水泵模块的喷药行为。系统对不同病害类型作出差异化决策。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，由虫害、病毒或自然老化引起的叶片问题则未喷洒。

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	喷洒农药
1	叶片边缘出现黄晕、穿孔	真菌性病害	是
2	叶片出现明显斑斑的枯黄	细菌性病害	是
3	叶片出现咬食痕迹	虫害	否
4	叶片出现斑驳、畸形等状态	病毒性病害	否
5	底部老叶均匀发黄并脱落	自然老化	否

该结果不仅证明了边缘AI视觉识别的有效性，同时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。

6.3 机器人越障性能测试结果

机器人越障性能的实验测试见表3，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矮台阶、田埂、连续矮障与小型沟壑4种障碍类型。根据表3的测试结果，机器人台阶爬升成功率为75%。这一数据直接验证了抬升式齿条、抬升齿轮等自主设计的3D打印结构在越障动作中的有效性。

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 8 cm	抬升杠辅助跨越	92%
田埂	高度 8 cm, 宽度 20 cm	抬升杠辅助跨越	85%
连续矮障	高度 4 cm, 间隔 60 cm	直接行驶	90%
小型沟壑	高度 10 cm	抬升杠辅助行驶	75%

实验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。75%的台阶爬升成功率表明该设计能够较好地支持机器人在田埂、垄沟等不平整地形的田野中稳定作业。

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, 本文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(8): 41-44.
Liu S W. Design and optimization of energy management systems in automated agricultural operations[J]. Farm Machinery Using & Maintenance, 2025(8): 41-44.
- [2] Zhang J, Lyu S T, Pan Y F, 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, 196: 105252.
- [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(8): 713-721.
Pan Y H, Pan K L, Liu G G, et al. Optimization of junction-to-case thermal resistance of TO-3 package for two-chip power devices[J]. Semiconductor Technology, 2023, 48(8): 713-721.
- [4] Le N T, Truong C T, Nguyen H H, et al. Yaw angle determination of a mobile robot operating on an inclined plane using accelerometer and gyroscope[J]. Measurement, 2025, 247: 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]. 物联网技术, 2026, 16(8): 11-14, 17.
Zhang J, Wang L, Liu W. Research on real-time fire monitoring and alarm system based on vision and sensor fusion[J]. Internet of Things Technologies, 2026, 16(8): 11-14, 17.
- [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): 37-40.

Wang B K, Wu J L, Dong Z. Design of intelligent monitoring system based on STM32[J]. Practical Electronics, 2023, 31(10): 37-40.

- [7] McCole M, Bradley M, McCaul 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, 20: 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(5): 31-33.
Mo L, Long S Y, Huang R, et al. Design of attitude calculation algorithm for small aircraft based on quaternion combined PI filter[J]. Automation & Instrumentation, 2023(5): 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(8): 137-140.
Sun W C. Leakage detection method of irrigation pump shaft seal based on machine vision algorithm[J]. Machine China, 2025(8): 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.
Zhu H B, Wang M P, Bai L Z, et al. Maize pest and disease detection and precise variable spraying system based on visual recognition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S2): 210-221.

[作者简介]



吴梓豪(2005—), 男, 嘉应学院物理与电子工程学院在读, 主要研究方向为三维建模和机器视觉。

刘元林(1970—), 男, 嘉应学院物理与电子工程学院教授, 主要研究方向为机械结构损伤无损检测技术、机械设计及理论。

李扬(2005—), 男, 嘉应学院物理与电子工程学院在读, 主要研究方向为模块化农业机器人的智能感知与协同控制算法。

张子杰(2004—), 男, 嘉应学院物理与电子工程学院在读, 主要研究方向为嵌入式。

陈锐涛(2005—), 男, 嘉应学院物理与电子工程学院在读, 主要研究方向为机器视觉。

赵曼伶(2004—), 女, 嘉应学院物理与电子工程学院在读, 主要研究方向为智能光电子系统与三维数字化创新设计。

金扬印(1976—), 男, 梅州市鑫农业机械制造有限公司总经理, 主要研究方向为果蔬自动化设备。