

双通道蔗种智能筛选机劣种剔除机构精准控制系统设计

李尚平<sup>1,2</sup> 黄伟斌<sup>1,3</sup> 陆河舜<sup>1,3</sup> 李凯华<sup>1,3</sup> 覃勇华<sup>1,3</sup>

(1. 广西民族大学物理与电子信息学院, 南宁 530006; 2. 广西蔗糖产业省部共建协同创新中心, 南宁 530006;  
3. 广西高校智慧无人系统与智能装备重点实验室, 南宁 530006)

**摘要:** 针对甘蔗智能备种生产线双通道智能筛选蔗种的需求,设计一种工业级精准甘蔗筛选控制系统,采用并行架构同步实现双通道蔗种的实时视觉质量检测与剔除控制。每通道通过实时检测输送带速度形成反馈,利用PID算法控制步进电机实现闭环调速,保障输送带速度稳定;利用双NE555芯片构建延时电路,确保剔除动作与劣种位置精确同步。系统以16路RS-485晶体管脉冲驱动器作为16路延时电路的信号驱动,高效衔接蔗种智能质量检测系统、16路延时电路与剔除执行机构,通过配置16路RS-485晶体管脉冲驱动器站号即可独立寻址,具备良好模块化、可扩展性与工程适用性。试验结果表明,双通道系统在不同速度下均具备较高的识别与筛选精度,且运行效率随速度提高而增强,验证了其良好的稳定性和实用性;在单通道系统性能试验中,当输送带速度为0.20 m/s、蔗种间隔为10 cm、劣种占比为40%的条件下,系统筛选准确率达到98%,筛选用时30 s,折合单通道筛选效率约为6 000段/h,效率提高100.5%;通过多因素正交试验表明,平均筛选准确率模型极显著,传送带速度和蔗种间隔对平均筛选准确率均具有极显著影响,劣种占比表现为显著影响。经试验参数优化,当输送带速度0.20 m/s、蔗种间距11.69 cm、劣种占比24.60%时,筛选准确率可达98.89%,能满足实际生产的要求。

**关键词:** 双通道蔗种智能筛选; 劣种剔除; 精准控制; PID控制; NE555延时电路

**中图分类号:** S24; TP39      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2026)10-0057-11

**OSID:**



Design of Precise Control System for Defective Seed Removal Mechanism of Dual Channel Sugarcane Seed Intelligent Screening Machine

LI Shangping<sup>1,2</sup> HUANG Weibin<sup>1,3</sup> LU Heshun<sup>1,3</sup> LI Kaihua<sup>1,3</sup> QIN Yonghua<sup>1,3</sup>

(1. School of Physics and Electronic Information, Guangxi Minzu University, Nanning 530006, China  
2. Guangxi Provincial and Ministerial Collaborative Innovation Center for Sugarcane Industry, Nanning 530006, China  
3. Key Laboratory of Intelligent Unmanned Systems and Intelligent Equipment, Nanning 530006, China)

**Abstract:** In response to the demand for dual-channel intelligent screening of sugarcane seeds in the intelligent sugarcane seed preparation production line, an industrial-grade precise sugarcane screening control system was designed. It adopted a parallel architecture to simultaneously achieve real-time visual quality inspection and rejection control of dual-channel sugarcane seeds. Each channel formed feedback by real-time detection of the conveyor belt speed, and the PID algorithm was used to control the stepping motor to achieve closed-loop speed regulation, ensuring the stability of the conveyor belt speed. A delay circuit was constructed by using dual NE555 chips to ensure that the rejection action was precisely synchronized with the position of the inferior species. The system used a 16-channel RS-485 transistor pulse driver as signal driver for 16-channel delay circuit, efficiently connecting the intelligent quality inspection system for sugarcane seeds, the 16-channel delay circuit and rejection actuator. By configuring the station number of 16-channel RS-485 transistor pulse driver, independent addressing can be achieved, featuring good modularization, scalability and engineering applicability. The test results showed that the dual-channel system had high recognition and screening accuracy at different speeds, and its operating efficiency was increased with the increase of speed, verifying its good stability and practicability. In the performance test of the single-channel system, when the conveyor belt speed was

收稿日期: 2025-11-27    修回日期: 2026-01-01

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52165009)和广西科技重点研发项目(桂科 AB18281016)

**作者简介:** 李尚平(1956—),男,教授,博士,主要从事智能制造和农业机械化研究,E-mail: spli501@vip.sina.com

**通信作者:** 李凯华(1985—),男,实验师,主要从事农业机械自动化研究,E-mail: 78281062@qq.com

0.20 m/s, the interval between sugarcane seeds was 10 cm, and the proportion of inferior species was 40%, the system screening accuracy rate reached 98%, and filtering took 30 s, which was equivalent to a single-channel screening efficiency of approximately 6,000 segments per hour, with an efficiency increase of 100.5%. The multi-factor orthogonal experiments showed that the average screening accuracy model was extremely significant. Both the conveyor belt speed and the sugarcane seed interval had extremely significant effects on the average screening accuracy, and the proportion of inferior seeds showed a significant influence. After optimizing the experimental parameters, when the conveyor belt speed was 0.20 m/s, the spacing between sugarcane seeds was 11.69 cm, and the proportion of inferior seeds was 24.60%, the screening accuracy rate can reach 98.89%, which can meet the requirements of actual production.

**Key words:** dual-channel intelligent screening of sugarcane seeds; elimination of inferior species; precise control; PID control; NE555 delay circuit

## 0 引言

甘蔗是我国重要的糖料和经济作物,广西是全国种植甘蔗面积最大的地区<sup>[1]</sup>,甘蔗产业已成为广西经济发展的重要支柱产业<sup>[2]</sup>。甘蔗良种是保障甘蔗出芽率高的前提<sup>[3]</sup>。然而,当前蔗种筛选以人工为主,存在劳动强度大、效率低、标准不统一等问题,严重制约甘蔗生产机械化与良种化水平。《“十四五”全国农业机械化发展规划》明确提出“推进主要农作物全程机械化,加快智能农机装备研发应用”<sup>[4]</sup>,研发具备实时检测、智能判别与自动剔除功能的一体化蔗种筛选装备,促进广西甘蔗糖业高质量发展<sup>[5]</sup>。

近年来,随着计算机视觉、深度学习与嵌入式控制技术的快速发展,国内外学者在智慧农业领域开展了大量研究<sup>[6-10]</sup>。在甘蔗种智能识别方面,DAY等<sup>[11]</sup>提出了一种基于YOLO v7的实时检测系统,用于自动识别甘蔗上的节点、芽眼和端部,实现平均精度84.9%与推理速度62.5 f/s,为甘蔗种植质量的在线评估提供了可行方案;SINDHE等<sup>[12]</sup>提出了一种基于YOLO v5的甘蔗芽检测方法,在自建数据集上实现检测准确率最高79%;李尚平等<sup>[13]</sup>提出一种基于改进YOLO 11n的轻量级蔗芽检测模型,通过引入Sobel卷积分支、小波池化与LSCDECD检测头,在自建数据集上实现mAP@0.5为99.4%,动态识别率达99.0%,显著优于现有方法。然而,现有研究集中在检测层面,在劣种精准剔除控制精度和生产效率兼顾的情况下,尚还缺乏相关研究。

相比之下,水稻、小麦、马铃薯等主要农作物的智能筛选装备已取得显著进展。刘爱民等<sup>[14]</sup>基于劣变种子米粒颜色变化的光学特性,研制出杂交水稻劣变种子光学分选机,可有效剔除粉质化、穗芽和霉变粒,单次分选使发芽率提升5~23个百分点,效率达1.4 t/h;胡艳等<sup>[15]</sup>开发了一套融合图像识别与FPGA实时控制的小麦分选系统,在全自动模式

下高效分离霉变、虫蚀、破损、未熟及异色5类不完善种粒,系统识别率超94%,分选成功率超97%;邓立苗等<sup>[16]</sup>开发了一套基于机器视觉的马铃薯智能分选系统,在水果分选机基础上融合视觉识别与上下位机协同控制,采用近似椭圆法、逐点检测和自适应阈值分割分别实现形状、绿皮与缺陷检测,并结合缺陷面积比与压力传感器完成品质与重量分级,系统综合准确率达90%,分选速度25个/s。

针对甘蔗智能备种生产线智能筛选系统存在的问题,本文采用并行架构同步实现双通道蔗种的实时视觉质检与剔除控制<sup>[17-18]</sup>,每通道采用PID算法通过闭环调控步进电机转速<sup>[19-21]</sup>,确保输送带速度稳定;基于双NE555芯片构建高精度延时电路<sup>[22]</sup>,实现剔除动作与劣种位置精准同步;系统以16路RS-485晶体管脉冲驱动器作为16路延时电路的信号驱动<sup>[23-24]</sup>,集成蔗种智能质量检测系统、延时电路与执行机构,各通道的16路RS-485晶体管脉冲驱动器可通过ID号独立寻址,以期具备良好的模块化、可扩展性与工程适用性,适于甘蔗备种生产线高效的自动筛选作业要求。

## 1 智能筛选机组成及工作原理

课题组自主研发的蔗种智能备种生产线如图1a所示,由提升机构、1台智能切种机、2台智能筛选机、连续脱毒池及2台自动包装机组成。甘蔗智能切种机具备较高的作业效率,每小时可切出蔗种6000~8000段。为保障生产线高效稳定运行,每台切种机需配套2台蔗种智能筛选机。为提高智能筛选的效率和精度,降低设备成本,本文主要是将双通道蔗种智能筛选机通过1台上位机进行集成控制,同时启动2个进程进行蔗种智能质量检测,每个进程还负责向专属的剔除通道发送剔除信号,各通道的劣种剔除控制采用模块化设计,剔除系统的控制由上位机实现,并通过USB转RS-485接口,向1个16路RS-485晶体管脉冲驱动器下发指令,该驱

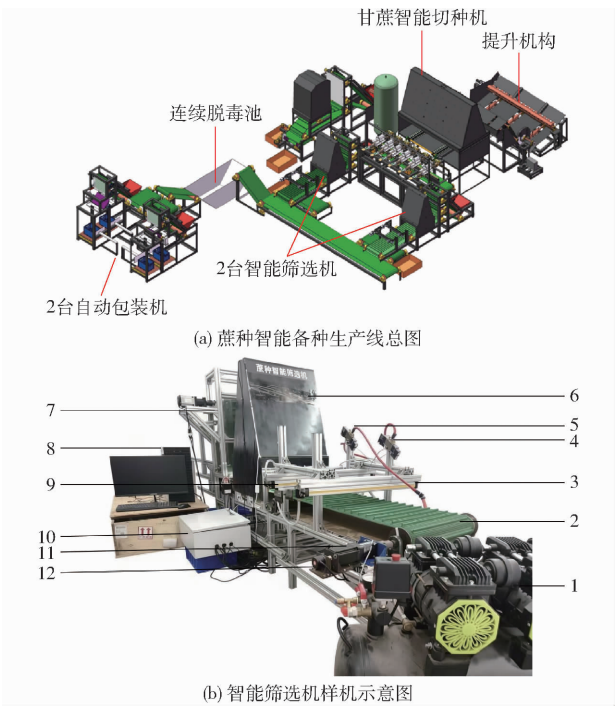


图 1 智能备种生产线及蔗种智能快速筛选机结构图  
Fig.1 Intelligent seed preparation production line and structural diagram of intelligent rapid sugarcane seed selector  
1. 空压机 2. 输送平带 3. 第 2 剔除机构 4. 第 2 二位五通电磁阀 5. 第 1 二位五通电磁阀 6. 蔗种质量检测机构 7. 供种机构 8. 上位机 9. 第 1 剔除机构 10. 控制箱 11. 步进电机 12. 编码器

动器作为 16 路延时电路的信号驱动,再经可调延时电路后触发双控二位五通电磁阀,实现双劣种剔除机构的精准控制。

单通道的蔗种智能筛选机结构如图 1b 所示,分为有序供种机构、质量检测机构、不合格的甘蔗种精准剔除机构。质量检测机构包括图像采集黑箱、输送带;不合格的蔗种精准筛选采用双剔除机构,包括 2 个条形无杆气缸(带有刮蔗板)。工作过程中,切段后的蔗种首先输送到集蔗箱内,经提升带有序提升、理蔗板整理杂乱蔗后,甘蔗段被横向有序由输送带将甘蔗种送入图像采集黑箱,黑箱内的海康工业相机动态实时采集甘蔗种图像数据,通过 YOLO v8-SD 模型对蔗种的切口与蔗节进行动态实时智能识别,并结合单目相机测距算法,实现对切口与相邻蔗节之间距离的精确测算,从而完成蔗种质量自动跟踪、判别<sup>[25]</sup>。在此基础上,进一步融合“划线法”策略,当被判定为劣种,立即向剔除控制系统发送剔除信号,分配任务给 1 路延时电路进行延时,延时后触发双控二位五通电磁阀,无杆气缸执行剔除动作。

广西壮族自治区糖业发展办公室印发了《糖料蔗脱毒种苗质量要求(试行)》,根据通知对甘蔗种苗的质量要求,需对甘蔗智能切种机切出的蔗种进



图 2 蔗种特征  
Fig.2 Sugarcane variety characteristics

## 2 双通道蔗种智能筛选机检测系统设计

### 2.1 蔗种智能筛选机检测方案

在课题组已开发的甘蔗种智能质量检测系统中,采用 1 台上位机进行单通道智能筛选控制,存在成本高,效率低的问题。并且剔除控制系统以单片机为主控单元,剔除机构为步进电机,在高速检测工况下,难以满足实时剔除的高效率和高精度要求。

针对双通道高速实时检测和高速精准剔除的需求,采用 1 台上位机双进程的控制方式,实现对双通道蔗种智能质量检测及劣种的高效剔除控制,每个通道采用 16 路 RS-485 晶体管脉冲驱动器作为 16 路延时电路的信号驱动,增加双剔除机构且更换动力为高速机械式带导轨无杆气缸(OSP-P25-800 型),气缸单向行程运动时间在 1 s 以内。在确保智能质量检测精度的前提下,可提高剔除效率。双通道蔗种智能筛选机硬件方案如图 3 所示。

### 2.2 双通道蔗种质量检测系统

双通道蔗种智能质量检测与快速剔除控制上位机流程如图 4 所示,基于并行的工业视觉检测架构,系统利用高性能 Intel Core i5-12600KF 型处理器(具有 10 核 16 线程,包括 6 个性能核心和 4 个效率核心)与 NVIDIA GeForce RTX 4070 显卡的强大计算能力,配合 PyTorch 2.2.2 深度学习框架,在 Windows 11 操作系统上实现双进程工业视觉检测。2 路工业相机图像分别输入独立的处理进程,每个进程均加载专用的 YOLO 蔗节、切口特征智能检测算法模型,对蔗种进行实时推理与质量智能判别。当系统识别出劣种时,立即生成专属的剔除指令,并将其封装为 Modbus 功能码任务,提交至对应通道的异步通信队列。后台运行 2 个独立 Modbus 通信线程分别负责监听各自通道的任务队列,并直接与所属通道连接的 16 路 RS-485 晶体管脉冲驱动器

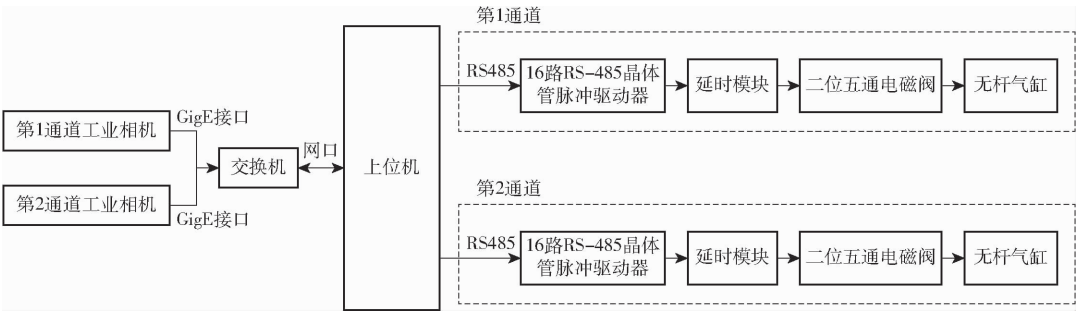


图3 双通道蔗种智能筛选机硬件方案框图

Fig. 3 Block diagram of dual-channel sugarcane seed intelligent screening machine hardware solution

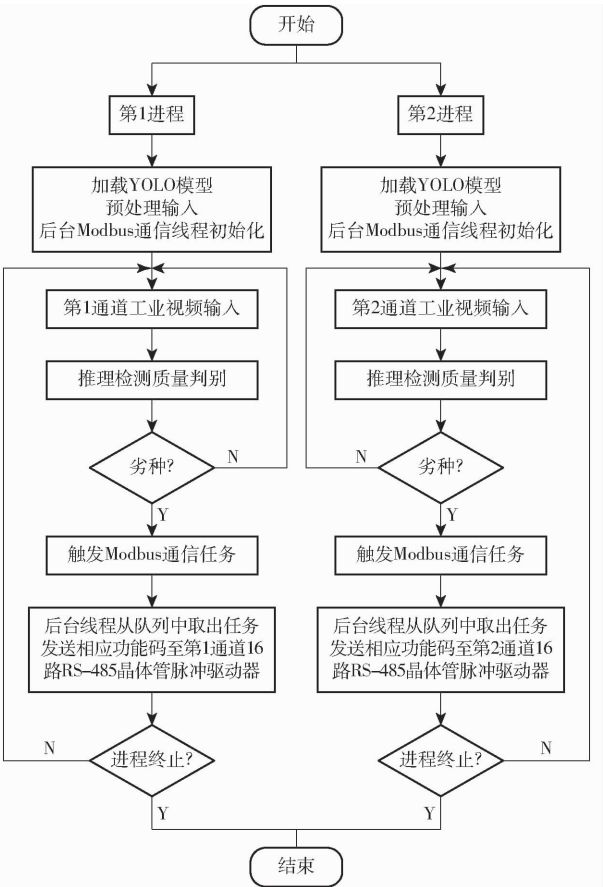


图4 上位机软件流程图

Fig. 4 Host computer software flowchart

通信进行指令下发,发送互不干扰的控制信号,从而驱动无杆气缸进行精准剔除。

3 单通道劣种精准剔除控制系统

3.1 剔除控制系统建模

蔗种智能筛选机采用模块化系统架构,由蔗种质量智能检测模块、蔗种输送模块、精准剔除控制模块3部分协同工作。当蔗种质量智能检测系统基于图像识别与特征分析算法,对输送带上流动的蔗种进行实时质量评估时,一旦识别出劣质蔗种,系统即通过“划线法”生成剔除信号,即每个劣种信号的发出都是在同一个位置。

由于2个剔除执行机构在机架上的物理位置

固定,分别与信号发出位置保持恒定距离  $L_1$  和  $L_2$ ,而蔗种随输送带以匀速  $V$  运动,所以劣种从信号触发位置到达剔除执行位置所需时间  $T_i$  计算式为

$$T_i = \frac{L_i}{V} \quad (i = 1, 2)$$

根据公式(1),控制系统实现精准剔除需2个条件,保障输送带的匀速运行,以消除速度波动对时序计算的干扰,确保时间和位置映射关系的准确性;构建高精度时间延时模块,实现不漏剔、不误剔劣种,依据预设的  $L_1$ 、 $L_2$  及实测输送速度  $V$  可计算延时时间,精准设置延时后触发剔除机构,实现劣种在指定位置的精准剔除。

3.2 基于PID控制算法的输送带速度闭环控制

为了实现智能筛选设备传送带均匀平稳地运动,驱动传送带的步进电机采用增量式PID闭环调速控制,控制框图如图5所示。计算设定值(目标值)与实际测量值之间的误差,PID控制算法通过对误差的比例(P)、积分(I)、微分(D)3种调节作用的线性组合调整控制器输出,从而实现对系统状态的有效控制。PID控制器数学表达式为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

式中  $u(t)$ ——时刻  $t$  控制器输出  
 $e(t)$ ——设定值与实际反馈值之差,即偏差  
 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ ——比例、积分和微分系数

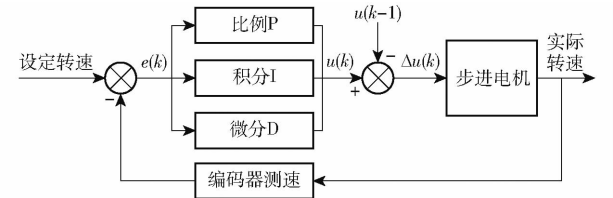


图5 步进电机PID调速控制框图

Fig. 5 PID speed control block diagram of stepper motor

增量式PID控制算法是对标准PID算法的改进形式,核心在于每次只计算控制量的增量,适合于数字控制。因为只需要存储最近几次的偏差值即可计

算出新的控制信号,减少内存占用。增量式 PID 表达式为

$$\Delta u(k)=u(k)-u(k-1)=K_p(e(k)-e(k-1))+K_i e(k)+K_d(e(k)-2e(k-1)+e(k-2)) \quad (3)$$

$k$  表示离散时间点,  $\Delta u(k)$  为第  $k$  次采样时刻控制增量,  $e(k)$  为第  $k$  次偏差。输送带由步进电机带动,步进电机的精准调速采用 STM32F1ZET6 单片机作为主控芯片,利用编码器作为步进电机的速度测量传感器。

3.2.1 步进电机闭环调速系统硬件

以 STM32F103ZET6 微控制器为核心,包括增量式编码器信号采集电路、5 V 转 3.3 V 光耦隔离模块、步进电机驱动器及触摸显示屏人机交互模块,整体硬件架构如图 6 所示。

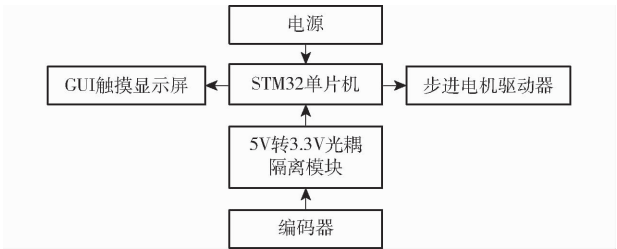


图 6 步进电机调速硬件架构

Fig. 6 Hardware architecture of stepper motor speed regulation

选用 E6B2 - CWZ5G 型增量式光电编码器,作为步进电机测速传感器,分辨率为 1 000 脉冲/转,供电电压 DC5V - 24V,推挽输出。5 V 转 3.3 V 光耦隔离模块选择最大频宽为 3 200 Hz,编码器通过刚性联轴器与步进电机输出轴机械同轴连接,通过减速器和输送带的动力连接滚轮,可计算输送带的运行速度。选用 DM542 型两相混合式步进电机及相应驱动器,支持脉冲 + 方向控制模式。STM32 的 GPIO 引脚输出的控制信号分别连接至驱动器的 PUL +、DIR + 输入端。选用 4.3 英寸 TFT - LCD 电阻式触摸屏(分辨率 480 像素 × 272 像素,RGB 接口),通过 FSMC 并行总线与 STM32 连接。编码器输出 A、B 相正交脉冲信号经高速光电耦合器电气隔离后,接入 STM32F103ZET6 的通用定时器 TIM3 接口,隔离模块电源由独立电源提供。

3.2.2 步进电机闭环调速系统软件

步进电机闭环控制软件流程图如图 7 所示,利用 STM32F103ZET6 内部通用定时器 TIM3 作为编码器接口,实时捕获编码器所产生的正交脉冲信号(A、B 相)。通过实时检测采样周期内编码器输出脉冲数及相位关系,精确计算步进电机转速。结合输送带的传动机构参数(减速比和滚筒直径),可换

算为输送带的实际线速度  $V$ ,作为闭环控制系统反馈量。

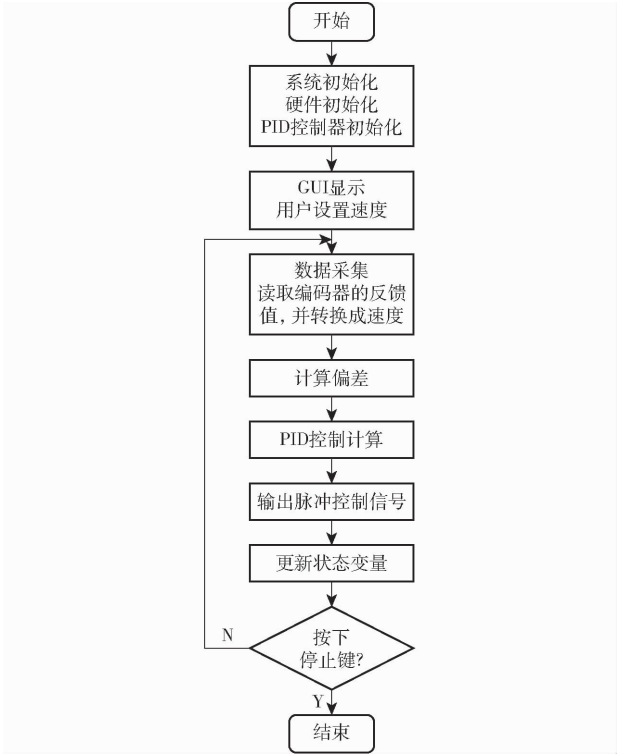


图 7 步进电机调速软件流程图

Fig. 7 Software flowchart for stepper motor speed regulation

在 TFT 触摸屏上可设置输送带速度和实时显示实际速度,同时配有步进电机启动和停止按钮。

基于 PID 算法的调速程序在 STM32 单片机上运行,同时整定 PID 各个参数使得系统达到最优。

在控制输出环节,系统启用通用定时器 TIM1,配置为 PWM 脉冲计数模式,用于生成驱动步进电机所需的脉冲序列。脉冲频率决定了电机的转速,而旋转方向则由独立的 GPIO 引脚控制,高低电平控制电机正反转。

3.3 单通道剔除机构组成及控制策略

3.3.1 系统架构与通道映射

为解决输送带高速运行时单剔除机构响应不足的问题,系统采用双剔除机构协同工作方式。2 套条形无杆气缸沿南北方向横跨输送带全宽,可分别推动劣种南端面或北端面,实现横向剔除。

输送带严格的匀速运动为精准可延时剔除方法提供保障。系统配置 16 路独立的精准延时模块,由 16 路 RS - 485 晶体管脉冲驱动器驱动。剔除系统架构如图 8 所示,选择 16 路是为了在劣种较密集时,能够同时处理多个待剔除目标,并将通道均分为 2 组,分别控制 2 套气缸。

接线方式上,奇数路延时输出(1、3、5、7、9、11、13、15)依次连接第 1 双控二位五通电磁阀的左、右

线圈,控制第 1 剔除气缸;偶数路(0、2、4、6、8、10、12、14)依次连接第 2 双控二位五通电磁的左、右线圈,控制第 2 剔除气缸。

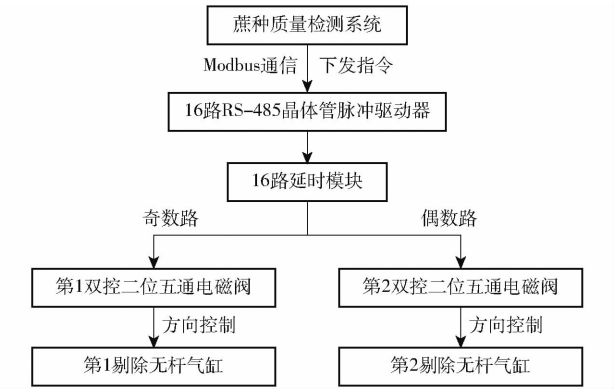


图 8 剔除系统架构

Fig. 8 Remove architecture of system

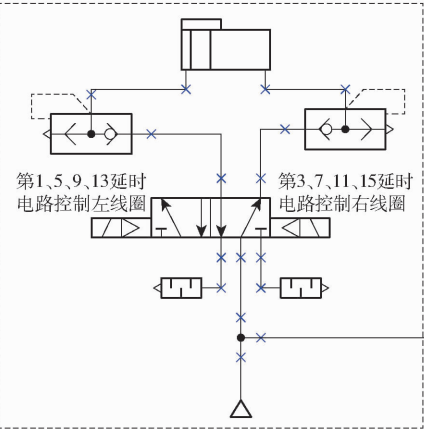
3.3.2 轮询派发与剔除控制策略

输送带自西向东运动,蔗种横向放置于输送带,轴线沿南北方向,两端圆形端面分别朝向南、北两侧。剔除动作只需滑块带动刮板单次单向移动,推动对应端面使劣种脱离输送带,动作完成后滑块停留在当前位置,无需返回初始位置。

为此,系统采用双控二位五通电磁阀,阀在任意线圈接收 1 个短脉冲后即可换向,并在断电后保持当前位置,无信号时气路封闭,滑块不会自行移动。相比单控阀加弹簧复位方案,该结构避免了回程运动可能对合格蔗种剔除,气动原理图如图 9 所示。为保证首次剔除有效,系统在上位机启动时执行初始化,通过第 0 和第 1 通道各输出 1 次低电平脉冲,使 2 套滑块移动到统一的起始位置并保持。若未初始化,滑块可能处在无效端,导致首次剔除失败。

正常运行时,上位机按通道 0 ~ 15 的顺序循环分配剔除任务。检测到劣种后,分配下一个可用通

第1剔除气缸



道,通过 Modbus RTU 协议使对应 IO 通道短暂输出低电平,信号经预设延时后,由延时模块转换为上升沿脉冲,驱动相应电磁阀线圈完成 1 次剔除动作。由于奇数和偶数通道分别控制不同的气缸,连续的劣种会被交替分配给 2 套剔除机构,有助于均衡使用并提高处理能力。

3.3.3 基于双 NE555 芯片的精准延时电路设计

为满足剔除控制的实时性要求,设计的延时电路必须相互独立,同时能处理密集的任务,本文设计 16 路双 NE555 芯片的延时电路。

NE555 采用单稳态模式,结合外部电阻和电容元件构成 RC 延时网络,实现精确可控的脉冲延时输出。

NE555 为 8 脚封装的定时器芯片,内部包含比较器、触发器、放电晶体管等组件。延时时间计算公式为

T=1.1RC(4)

式中 T——延时时间,s  
R——充电电阻,Ω  
C——充电电容,F

延时电路如图 10 所示,由 2 个 NE555 芯片组成,上半部分是输入端处理及第 1 级延时,输入信号接入 TR(引脚 2),通过 R2 和 C1 形成 RC 网络。当输入端由高变低时,触发 U1 进入单稳态状态。输出 Q(引脚 3)拉高,D1 为二极管,防止 C2 反向充电,加快放电速度,提高响应精度。

下半部分(U2)输出端驱动与第 2 级延时/控制,U2 也工作于单稳态模式,但其触发源来自 U1 的输出(即 Q 端)。当 U1 输出高电平时,经 C5 耦合至 U2 的 TR 端,使其触发。R4 与 C3 构成 U2 的触发电路,确保稳定触发。U2 的延时时间由 R3 和 C4 决定。

输出端连接 LED(D2、D4)和继电器 RL1(OMIH-

第2剔除气缸

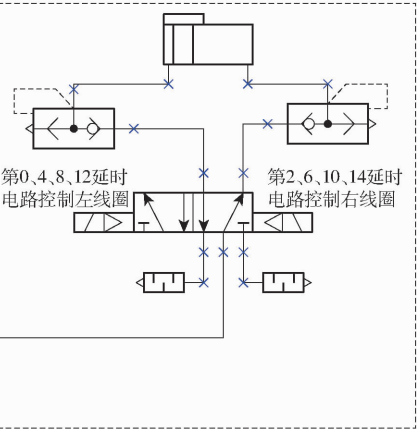


图 9 气动原理图

Fig. 9 Pneumatic schematic

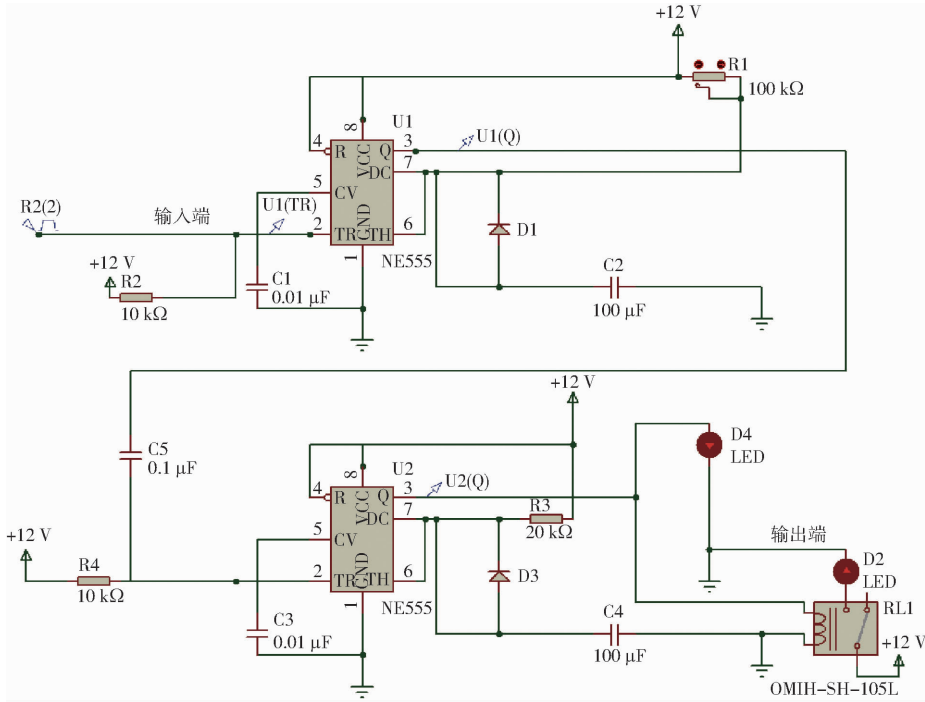


图 10 单个延时电路图

Fig. 10 Single delay circuit diagram

SH-105L),表示模拟实际负载,实际电路连接的是二位五通电磁阀的其中一端。D2 为状态指示灯,亮表示输出有效。D3 同样为保护二极管,防止 C4 反向充电。

3.3.4 剔除控制电路仿真

为了验证电路延时效果,利用 Protues 软件对剔除控制电路进行仿真,第 1 级延时电容 C2 选择 100 μF,滑动变阻器 R1 选择 10 kΩ,并利用模拟分析工具监测第 1 级延时芯片 Q 引脚的电压变化,仿真结果如图 11 所示,理论计算的持续高电平时间为 1.1 s,仿真结果为 1.1 s。

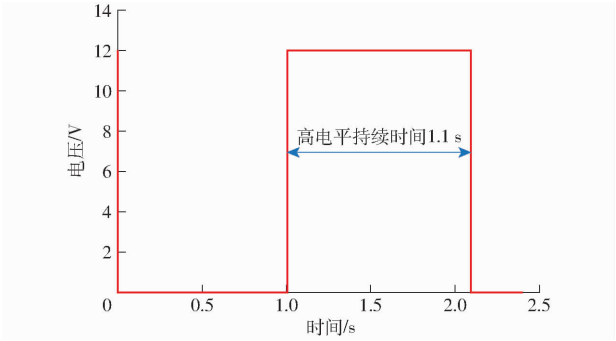


图 11 筛选控制电路仿真结果

Fig11 Simulation results of filter control circuit

4 蔗种智能筛选机样机试验

4.1 试验环境

单通道蔗种智能质量检测系统运行硬件环境：处理器为 Intel Core i5-12600KF,显卡为 NVIDIA GeForce RTX 4070,内存为 Kingston 16GB DDR4-

3200;软件环境操作系统为 Windows 11,编程语言为 Python 3.9,开发平台为 PyCharm,基于 PyTorch

4.2 试验方案

为了验证整机性能,设计单因素试验和正交试验,选取输送带速度、蔗种间隔、劣种占比作为影响因素,选取平均识别准确率、平均剔除筛选准确率、筛选用时作为试验指标。正交试验采取三因素三水平,试验蔗种为广西崇左市扶绥县亚热带农科新城提供的半年生,品种有中蔗 9 号、中蔗 14 号、桂糖 42 号,试验按照不同比例,将蔗种混合,共 50 根劣种,试验样机第 1 剔除机构和第 2 剔除机构分别布置在剔除信号发出位置下游 0.578 m 和 0.984 m 处。针对不同的输送带速度需要调整不同的延时时间,不同传送带速度延时控制时间可以根据式(1)计算得到,例如当传送带速度为 0.2 m/s 时,控制第 1 个剔除机构延时时间设置为 2.89 s。

4.3 输送带速度对劣种剔除准确率影响

为研究输送带速度对劣种剔除准确率的影响,设计单因素试验,输送带输送蔗种间隔设置为 10 cm,劣种占比 100%,试验设置 0.20、0.30、0.40 m/s 3 个速度水平,每个水平下均使用相同数量 50 根劣种,每个速度水平重复试验 3 次,分别记录每次蔗种质量检测系统识别准确率和筛选准确率。最终计算各速度下的平均识别准确率、平均筛选准确率以及完成全部 50 根蔗种处理所需时间,试验结果如表 1 所示。

表 1 输送带速度对劣种筛选准确率影响试验结果  
Tab.1 Experimental results on influence of conveyor belt speed on accuracy of inferior seed screening

| 传送带速度/<br>( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 平均识别准<br>率/% | 平均筛选<br>准确率/% | 用时/s |
|--------------------------------------------|--------------|---------------|------|
| 0.20                                       | 100          | 100           | 30   |
| 0.30                                       | 99.33        | 98.00         | 20   |
| 0.40                                       | 67.33        | 65.33         | 15   |

从表 1 可见,在速度 0.20 ~ 0.30 m/s 内,系统表现出良好的鲁棒性,识别与筛选准确率均不低于 98%,且 3 次重复试验结果波动较小,说明该速度范围内系统运行稳定可靠。然而,当速度为 0.40 m/s 时,各项指标均大幅下降,表明质量检测系统和筛选控制系统难以保持整个系统筛选准确率。原因是当传送带速度达到 0.4 m/s 时,蔗种智能质量检测系统的识别率因蔗种高速运动而快速下降,合格的蔗种进而被判定为劣种,合格的蔗种被实施剔除;同时又因为跟踪算法对高速运动的物体有时跟踪不到需要剔除的劣种,导致系统未向剔除控制系统发出劣种剔除信号,最终使蔗种筛选准确率出现骤降。

4.4 蔗种间隔对劣种筛选准确率影响

为分析蔗种间隔对劣种筛选准确率的影响,选取 3 个蔗种间隔水平:5、10、15 cm,输送带速度选取 0.20 m/s,劣种占比为 20%,设计 3 组单因素试验,每组试验重复 3 次,最后取平均值。试验结果如表 2 所示。

表 2 蔗种间隔对劣种筛选准确率影响试验结果  
Tab.2 Experimental results on influence of sugarcane seed spacing on accuracy of inferior seed screening

| 蔗种间隔/<br>cm | 平均识别准确<br>率/% | 平均筛选准确<br>率/% | 用时/s |
|-------------|---------------|---------------|------|
| 5           | 96.00         | 78            | 15   |
| 10          | 97.33         | 96            | 30   |
| 15          | 98.67         | 98            | 45   |

表 2 结果表明,随着蔗种间隔从 5 cm 增至 15 cm,平均识别准确率由 96% 提升至 98.67%,平均筛选准确率也由 78% 提高至 98%。说明当蔗种过于密集时,蔗种之间有粘连,导致识别系统识别率下降,同时设计剔除刮板的接触面宽度大于蔗种直径,剔除刮板横向移动时会把其他相邻的合格蔗种剔除,进而影响筛选准确率。而当间隔 10 cm 及以上时,系统识别与筛选准确率均达到理想水平,表明系统具备筛选蔗种鲁棒性。

4.5 劣种占比对劣种筛选准确率影响

为研究劣种占比对劣种筛选准确率的影响,选

取 3 个劣种占比水平:20%、30% 和 40%,输送带速度设置为 0.20 m/s,蔗种间隔为 10 cm。设计 3 组单因素试验,每组试验重复 3 次,取平均值,试验结果如表 3 所示。从表 3 可见,当劣种占比提升至 40% 时,平均识别准确率由 97.33% 提高至 98%,平均筛选准确率保持在 96% 以上,表明系统在不同劣种占比下均可以保持稳定工作。

表 3 劣种占比对劣种筛选准确率影响试验结果  
Tab.3 The impact of inferior variety proportion on screening accuracy in inferior variety trials

| 劣种占比/% | 平均识别准<br>率/% | 平均筛选准<br>率/% | 用时/s |
|--------|--------------|--------------|------|
| 20     | 97.33        | 96.00        | 30   |
| 30     | 98.00        | 97.33        | 30   |
| 40     | 98.00        | 98.00        | 30   |

4.6 Box – Behnken 响应面正交试验

为研究相关因素对整机的筛选性能影响,设计正交试验,以输送带速度、蔗种间隔、劣种占比为正交试验的试验因素,各因素取 3 个水平,如表 4 所示。选取平均识别准确率、平均筛选准确率、筛选用时作为试验指标,每组试验进行 3 次重复性试验,结果取平均值。

表 4 正交试验因素及编码  
Tab.4 Factors and coding of orthogonal experiment

| 编码 | 因素                                         |         |        |
|----|--------------------------------------------|---------|--------|
|    | 输送带速度/<br>( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 蔗种间隔/cm | 劣种占比/% |
| -1 | 0.200                                      | 5       | 20     |
| 0  | 0.275                                      | 10      | 30     |
| 1  | 0.350                                      | 15      | 40     |

采用 Box – Behnken 响应面分析法进行三因素三水平正交试验,并计算平均识别准确率、平均筛选准确率、筛选用时。试验结果如表 5 所示,表中 A、B、C 为试验因素编码。

当输送带速度为 0.20 m/s、蔗种间隔为 10 cm、劣种占比为 40% 时,系统筛选准确率达到 98%,系统筛选用时 30 s,折合单通道筛选效率约为 6 000 段/h,效率提高 100.5%。

对平均筛选准确率进行方差统计分析,对回归模型中各项参数进行 F 检验,结果如表 6 所示。由表 6 可知,平均筛选准确率模型极显著,失拟项不显著,回归有效,输送带速度及其平方项对平均筛选准确率均具有极显著影响;蔗种间隔及其平方项表现为极显著影响,交互作用 AB 与劣种占比 C 表现为显著影响。

根据表 6 数据,使用 Design-Expert 软件进行平

表 5 正交试验结果

Tab.5 Orthogonal test results

| 试验<br>序号 | 因素 |    |    | 平均识别  | 平均筛选  | 用时/<br>s |
|----------|----|----|----|-------|-------|----------|
|          | A  | B  | C  | 准确率/% | 准确率/% |          |
| 1        | -1 | -1 | 0  | 96    | 78    | 15.0     |
| 2        | 1  | -1 | 0  | 64    | 64    | 8.6      |
| 3        | -1 | 1  | 0  | 98    | 98    | 60.0     |
| 4        | 1  | 1  | 0  | 70    | 70    | 34.3     |
| 5        | -1 | 0  | -1 | 97    | 96    | 30.0     |
| 6        | 1  | 0  | -1 | 66    | 66    | 17.1     |
| 7        | -1 | 0  | 1  | 98    | 98    | 30.0     |
| 8        | 1  | 0  | 1  | 78    | 76    | 17.1     |
| 9        | 0  | -1 | -1 | 94    | 72    | 10.9     |
| 10       | 0  | 1  | -1 | 98    | 96    | 43.6     |
| 11       | 0  | -1 | 1  | 96    | 80    | 10.9     |
| 12       | 0  | 1  | 1  | 98    | 96    | 43.6     |
| 13       | 0  | 0  | 0  | 94    | 94    | 21.8     |
| 14       | 0  | 0  | 0  | 94    | 92    | 21.8     |
| 15       | 0  | 0  | 0  | 92    | 90    | 21.8     |
| 16       | 0  | 0  | 0  | 92    | 92    | 21.8     |
| 17       | 0  | 0  | 0  | 92    | 90    | 21.8     |

表 6 平均筛选准确率方差分析

Tab.6 Variance analysis for average screening accuracy

| 方差来源           | 平方和      | 自由度 | 均方       | F      | P           |
|----------------|----------|-----|----------|--------|-------------|
| 模型             | 2 230.27 | 9   | 247.81   | 34.55  | <0.000 1 ** |
| A              | 1 104.50 | 1   | 1 104.50 | 154.01 | <0.000 1 ** |
| B              | 544.50   | 1   | 544.50   | 75.93  | <0.000 1 ** |
| C              | 50.00    | 1   | 50.00    | 6.97   | 0.033 4 *   |
| AB             | 49.00    | 1   | 49.00    | 6.83   | 0.034 7 *   |
| AC             | 16.00    | 1   | 16.00    | 2.23   | 0.178 9     |
| BC             | 16.00    | 1   | 16.00    | 2.23   | 0.178 9     |
| A <sup>2</sup> | 272.85   | 1   | 272.85   | 38.05  | 0.000 5 **  |
| B <sup>2</sup> | 154.12   | 1   | 154.12   | 21.49  | 0.002 4 **  |
| C <sup>2</sup> | 0.85     | 1   | 0.85     | 0.12   | 0.740 4     |
| 残差             | 50.20    | 7   | 7.17     |        |             |
| 失拟             | 39.00    | 3   | 13.00    | 4.64   | 0.086 1     |
| 误差             | 11.20    | 4   | 2.80     |        |             |
| 总和             | 2 280.47 | 16  |          |        |             |

注：\*\*表示影响极显著 ( $P < 0.01$ ), \* 表示影响显著 ( $0.01 \leq P < 0.05$ )。

均筛选准确率影响因素间的回归模型,得到平均筛选准确率  $Y$  对自变量二次多元回归方程为

$$Y = 91.6 - 11.75A + 8.25B + 2.5C - 3.5AB + 2AC - 2BC - 8.05A^2 - 6.05B^2 + 0.45C^2 \quad (5)$$

当劣种占比固定为 30% 时,输送带速度与蔗种间隔对平均筛选准确率影响的响应曲面如图 12a 所示。由图 12a 可看出,蔗种间隔对平均筛选准确率的影响比输送带速度更为显著,随着蔗种间隔的增加平均筛选准确率也随之增加,当蔗种间隔增加到一定值时,平均筛选准确率增加趋势变得平缓。

当蔗种间隔固定为 10 cm 时,输送带速度与劣种占比对平均筛选准确率影响的响应曲面如图 12b 所示。由图 12b 可看出,输送带速度对平均筛选准确率的影响比劣种占比更为显著。输送带速度在 0.2 ~ 0.35 m/s 范围内平均筛选准确率呈下降趋势;随着劣种占比从 20% 增加至 40%,平均筛选准确率呈上升趋势。

当输送带速度固定为 0.275 m/s 时,蔗种间隔与劣种占比对平均筛选准确率影响的响应曲面如图 12c 所示。由图 12c 可看出,蔗种间隔对平均筛选准确率的影响比劣种占比更为显著。随着蔗种间隔从 5 cm 增加至 15 cm,平均筛选准确率呈现持续上升趋势,且在蔗种间隔达到 13 ~ 15 cm 时趋于平稳,表明较大的蔗种间隔有利于提高识别和筛选精度。相比之下,劣种占比在 20% ~ 40% 范围内变化对准确率的影响相对较小,整体变化较为平缓,仅在极端处略有波动。说明在输送带速度固定的条件下,蔗种间隔是决定筛选性能的主要因素。

结合 Design-Expert 的数值分析模块得出当输送带速度为 0.20 m/s、蔗种间隔为 11.69 cm、蔗种占比为 24.86% 时,能取得最好的筛选准确率,为 98.90%。

4.7 双通道筛选机性能试验

为评估双通道筛选机整机性能,开展了系统测

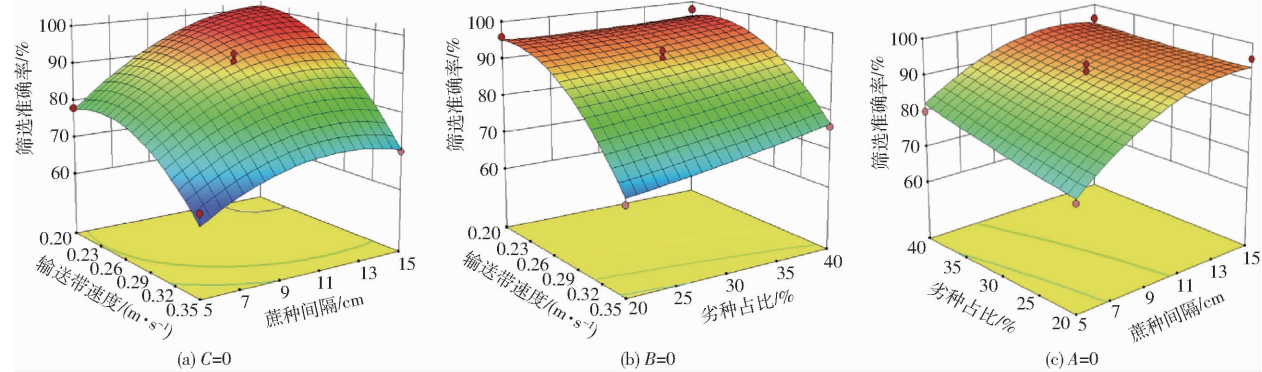


图 12 交互因素影响面

Fig. 12 Interactive factor response surface

试验。每个通道输送带上的蔗种间距均设定为 10 cm,并设置 3 个输送带速度水平 0.20、0.25、0.30 m/s。在每个速度水平下,均使用相同数量 50 段劣质蔗种进行测试,并重复试验 3 次。每次试验分别记录双通道蔗种质量检测系统识别准确率和筛选准确率。最终,对各速度水平下的 3 次重复数据取平均值,计算出对应的平均识别准确率、平均筛选准确率,以及完成全部 50 段蔗种处理所需的总时间,试验结果如表 7 所示。

表 7 双通道筛选机整机试验结果  
Tab.7 Test results of dual-channel screening

| 输送带<br>速度/<br>(m·s <sup>-1</sup> ) | 第 1 通道<br>平均识别<br>准确率/% | 第 2 通道<br>平均识别<br>准确率/% | 第 1 通道<br>平均筛选<br>准确率/% | 第 2 通道<br>平均筛选<br>准确率/% | 用时/<br>s |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 0.20                               | 100                     | 100                     | 100                     | 100                     | 30       |
| 0.25                               | 99.33                   | 99.33                   | 98.66                   | 98.66                   | 24       |
| 0.30                               | 99.33                   | 99.33                   | 98.00                   | 98.00                   | 20       |

由表 7 可知,随着输送带速度从 0.20 m/s 增至 0.30 m/s,第 1 通道和第 2 通道的平均识别准确率均维持在 99.33% 以上,其中输送带速度为 0.20 m/s 时达到 100%;平均筛选准确率也保持较高水平,分别为 100%、98.66% 和 98%。同时,处理时间随速度提升显著缩短,从 30s 减少至 20s。双通道系统在不同速度下均具备较高的识别与筛选精度,且运行效率随速度提高而增强,验证了其良好的稳定性和实用性。

5 结论

(1)针对蔗种智能备种生产线双通道高速筛选蔗种的需求,设计了一种工业级智能精准筛选控制系统,采用并行架构同步实现两通道蔗种的实时视觉质量检测与剔除控制,试验结果表明可实现双通道高效率的筛选,有效提高了筛选准确率和效率。

(2)基于 PID 算法对输送带速度进行闭环调速控制,为延时精准控制剔除机构奠定基础;设计双 NE555 芯片的精准延时电路;利用 16 路 RS-485 晶体管脉冲驱动器作为蔗种质量检测系统与 16 路精准延时模块联系的桥梁,驱动器与蔗种质量检测系统的通信方式采用 Modbus RTU 协议。整机试验结果表明,系统实现了实时高速精准筛选控制。

(3)充分利用上位机在多核方面所具备的丰富计算资源,采用双进程方式对 2 台蔗种智能筛选机系统进行集成,在双通道样机试验中验证了系统具有较高的识别和筛选精度,具有良好的稳定性和实用性;在单通道系统性能试验中,当输送带速度为 0.20 m/s、蔗种间隔为 10 cm、劣种占比为 40% 时,系统筛选准确率达到 98%,系统筛选用时 30 s,折合单通道筛选效率约为 6 000 段/h,效率提高 100.5%。多因素正交试验结果表明,当输送带速度、蔗种间隔对筛选准确率有极显著影响,劣种占比表现出显著影响,当输送带速度为 0.20 m/s、蔗种间隔为 11.69 cm、劣种占比为 24.60% 时,筛选准确率最佳,为 98.89%。满足实际需求。

参 考 文 献

[1] 何忠,谢国雪,林垚君,等. 遥感技术在我国甘蔗产业的应用综述[J]. 国土资源信息化, 2020(4):22-27.  
HE Zhong,XIE Guoxue,LIN Yaojun,et al. Summary of the application of remote sensing in Chinese sugarcane industry[J]. Land and Resources Informatization,2020(4):22-27. (in Chinese)

[2] 谢国雪,苏秋群,杨妮,等. 广西主导农业经济产业发展变化分析与对策建议[J]. 安徽农业科学,2024,52(5):255-259.  
XIE Guoxue,SU Qinqun,YANG Ni,et al. Analysis and countermeasures on the development and change of main cash crop industry in Guangxi[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2024,52(5):255-259. (in Chinese)

[3] 廖李权,邓宇驰,陈荣发,等. 中国甘蔗良种繁育与种茎制种技术[J]. 中国糖料,2025,47(1):85-92.  
LIAO Liquan,DENG Yuchi,CHEN Rongfa,et al. Technology for propagation and seed production of sugarcane in China[J]. Sugar Crops of China,2025,47(1):85-92. (in Chinese)

[4] 农业农村部办公厅. “十四五”全国农业机械化发展规划[J]. 畜牧产业, 2022(5):5-18.

[5] 唐亮东. 广西甘蔗糖业高质量发展新途径探讨[J]. 甘蔗糖业, 2023,52(6):63-68.  
TANG Liangdong. Exploration of new approaches on high-quality development of sugar industry in Guangxi[J]. Sugarcane and Canesugar,2023,52(6):63-68. (in Chinese)

[6] 袁杰,谢霖伟,郭旭,等. 基于改进 YOLO v7 的苹果叶片病害检测方法[J]. 农业机械学报, 2024,55(11):68-74.  
YUAN Jie,XIE Linwei,GUO Xu,et al. Apple leaf disease detection method based on improved YOLO v7[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(11):68-74. (in Chinese)

[7] 熊俊涛,何志良,汤林越,等. 非结构环境中扰动葡萄采摘点的视觉定位技术[J]. 农业机械学报, 2017,48(4):29-33,81.  
XIONG Juntao,HE Zhiliang,TANG Linyue,et al. Visual localization of disturbed grape picking point in non-structural environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4):29-33,81. (in Chinese)

[8] 陈耀晖,蔡武斌,孙博瀚,等. 基于深度学习与 Delta 机器人的病损柑橘上料部位初筛系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(6):535-545.  
CHEN Yaohui,CAI Wubin,SUN Bohan,et al. Design and experiment of defective citrus sieving system based on deep learning

- and Delta robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 535 – 545. (in Chinese)
- [9] 毕泽洋, 杨立伟, 吕树盛, 等. 基于 EDH – YOLO 的轻量型温室番茄检测方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊 2): 246 – 254. BI Zeyang, YANG Liwei, LÜ Shusheng, et al. Lightweight greenhouse tomato detection method based on EDH – YOLO[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 2): 246 – 254. (in Chinese)
- [10] 慕君林, 马博, 王云飞, 等. 基于深度学习的农作物病虫害检测算法综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 2): 301 – 313. MU Junlin, MA Bo, WANG Yunfei, et al. Review of crop disease and pest detection algorithms based on deep learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 301 – 313. (in Chinese)
- [11] DAY C, BUSCH A. Automatic detection of sugarcane billet nodes and eyes using machine vision[C] // 2023 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA), 2023: 320 – 324.
- [12] SINDHE P S, HEGADI R S. Sugarcane bud detection using YOLO v5[C] // International Conference on Recent Trends in Image Processing and Pattern Recognition, 2023: 202 – 212.
- [13] 李尚平, 刘建举, 王恒, 等. 基于 YOLO 11n – EWL 的甘蔗芽检测方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(11): 471 – 479. LI Shangping, LIU Jianju, WANG Heng, et al. Sugarcane bud detection method based on YOLO 11n – EWL[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(11): 471 – 479. (in Chinese)
- [14] 刘爱民, 张晓明, 蒋珊瑚, 等. 杂交水稻劣变种子光学分选效果初探[J]. 杂交水稻, 2020, 35(5): 31 – 35. LIU Aimin, ZHANG Xiaoming, JIANG Shanhu, et al. Optical separation effect of deteriorated hybrid rice seeds[J]. Hybrid Rice, 2020, 35(5): 31 – 35. (in Chinese)
- [15] 胡艳, 赵宇红, 张洪明, 等. 一种基于图像识别的小麦分选系统[J]. 现代电子技术, 2025, 48(15): 158 – 164. HU Yan, ZHAO Yuhong, ZHANG Hongming, et al. Wheat sorting system based on image recognition[J]. Modern Electronic Technique, 2025, 48(15): 31 – 35. (in Chinese)
- [16] 邓立苗, 杜宏伟, 徐艳, 等. 基于机器视觉的马铃薯智能分选方法与实现[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(5): 145 – 150. DENG Limiao, DU Hongwei, XU Yan, et al. Implementation of intelligent potato grading method based on computer vision[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(5): 145 – 150. (in Chinese)
- [17] CHAO K, PARK B, CHEN Y R, et al. Design of a dual-camera system for poultry carcasses inspection[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2000, 16(5): 581 – 587.
- [18] COATES A, NG A Y. Multi-camera object detection for robotics[C] // 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2010: 412 – 419.
- [19] BORASE R P, MAGHADE D K, SONDKAR S Y, et al. A review of PID control, tuning methods and applications[J]. International Journal of Dynamics and Control, 2021, 9(2): 818 – 827.
- [20] ZHANG M, XU C, LI L, et al. Optimization of PID controller for stepper motor speed control system based on improved sparrow search algorithm[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2024, 238(19): 9397 – 9411.
- [21] 许洋, 周奎, 杨亚会, 等. 基于增量式 PID 的步进电机速度控制系统设计[J]. 科技与创新, 2022(1): 172 – 175, 178. XU Yang, ZHOU Kui, YANG Yahui, et al. Design of step motorspeed control system based on incremental PID[J]. Science and Technology & Innovation, 2022(1): 172 – 175, 178. (in Chinese)
- [22] AISHIDANI S, ALSHABIBI S, TABREZ M, et al. Applications of 555 timer for development of low-cost system[C] // Advanced Energy and Control Systems: Select Proceedings of 3rd International Conference, 2022: 207 – 216.
- [23] CHAKRABORTY S, AITHAL P S. Industrial automation debug message display over Modbus RTU using C[J]. International Journal of Management, Technology and Social Sciences (IJMTS), 2023, 8(2): 305 – 313.
- [24] TAMBOLI S, RAWALE M, THORAIET R, et al. Implementation of Modbus RTU and Modbus TCP communication using siemens S7 – 1200 PLC for batch process[C] // 2015 International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM). IEEE, 2015: 258 – 263.
- [25] 李尚平, 覃勇华, 黄伟斌, 等. 基于 YOLO v8 – SD 的预切式甘蔗种质量检测方法研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 457 – 467. LI Shangpi, QIN Yonghua, HUANG Weibin, et al. Quality inspection method of pre-cut sugarcane seed based on YOLO v8 – SD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 457 – 467. (in Chinese)