中国农业大学学报 2024,29(8):204-212
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

封玉搏,赵晓顺,范晓飞,田瑞涛,刘景艳,孙磊. 基于机器视觉的智能种子分选机设计[J]. 中国农业大学学报,2024,29(08):204-212.
FENG Yubo,ZHAO Xiaoshun,FAN Xiaofei,TIAN Ruitao,LIU Jingyan,SUN Lei. Design of an intelligent seed sorting machine based on machine vision[J]. *Journal of China Agricultural University*,2024,29(08):204-212.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.08.17

基于机器视觉的智能种子分选机设计

封玉搏 赵晓顺* 范晓飞 田瑞涛 刘景艳 孙 磊
(河北农业大学 机电工程学院,河北 保定 071000)

摘 要 针对目前市场上种子分选装置多以传统机械式、半自动式为主,智能化程度不高、分拣准确率较低的问题,基于机器视觉技术设计一种智能种子分选机,主要由传输系统、供料系统、图像采集系统、种子筛选系统和控制系统五大部分构成。以'郑丹958'玉米种子为研究对象,以种子气流下斜抛的水平距离和传送带传输速度为寻优条件进行试验,确定最优气泵压力值和控制器脉冲频率。对960个种子样本(优质、劣质种子分别为824和136个)通过目标检测模型进行质量识别,判别种子质量,对种子状态进行标注框选和坐标记录。使用PLC(SIMATIC S7-200 CN,CPU224XP)分选模块控制直动式电磁阀组,对种子进行分选试验。结果表明:1)最优组合气泵压力值为0.3 MPa,控制器脉冲频率为3 175 Hz。2)优质、劣质种子识别率分别为93.69%和91.91%,种子分选率为89.6%。该分选机能够有效满足种子分选要求。

关键词 机器视觉;分选机;种子;线扫描相机;PLC
中图分类号 S24 **文章编号** 1007-4333(2024)08-0204-09 **文献标志码** A

Design of an intelligent seed sorting machine based on machine vision

FENG Yubo, ZHAO Xiaoshun*, FAN Xiaofei, TIAN Ruitao, LIU Jingyan, SUN Lei
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China)

Abstract Current seed sorting machines on the market are mostly traditional mechanical or semi-automatic type, which have low automation level and low sorting accuracy. In view of the problem, an intelligent seed sorting machine was designed based on machine vision technology. It is composed of transmission system, seed-feeding system, image acquisition system, seed-screening system and control system. Taking the 'Zheng Dan 958' corn seeds as the research object, the horizontal distance of the seed flow and the transmission speed of the conveyor belt is tested as the preferential conditions to determine the pressure value of the optimal air pump and the controller pulse frequency. A total of 960 seed samples (The number of high-quality and inferior seeds was 824 and 136, respectively.) are identified by the target detection model. The quality of the seeds was evaluated, and the seed state is marked and coordinate recorded. The PLC (SIMATIC S7-200 CN, CPU224XP) sorting module was used to control the direct-action solenoid valve set to perform sorting tests on the seeds. The results show that: 1) The pressure value of the optimal combination air pump is 0.3 MPa, and the controller pulse frequency is 3 175 Hz. 2) The recognition rate of high quality and inferior seeds was 93.69% and 91.91%, respectively, and the seed sorting rate was 89.6%. In conclusion, the machine can effectively meet the seed sorting requirements.

Keywords machine vision; seed sorting machine; seed; line scan camera; PLC

收稿日期:2023-11-08
基金项目:国家大宗蔬菜产业技术体系(CARS-23);河北省重点研发计划项目(20327403D);河北省省属高校基本科研业务费项目(KY2022020)
第一作者:封玉搏(ORCID:0000-0001-7603-3755),硕士研究生,E-mail: fengyubo169@163.com
通讯作者:赵晓顺(ORCID:0000-0001-9569-3505),副教授,主要从事智能农机装备、种子加工与检测研究,E-mail: zhao_xsh@126.com

种子是重要的农业生产资料，传统的种子分选方法依靠人工操作和传统机械等方式进行，工作效率低下，而且容易出现误检、漏检等问题[1-3]。随着机器视觉技术的快速发展，越来越多的种子检测机构开始使用机器视觉技术进行检测分选[4-5]，其中色选机是应用较为广泛的一种设备。如欧洲的CIMBRIA公司和美国VMEK公司生产的色选机采用斜式溜槽的供料系统，对待测种子进行颜色识别，采用吹气的方式将异色种子吹出，分选速度快、自动化程度高，但不能对种子的质地、纹理等表型性状进行综合判断[6]。已有研究利用机器视觉技术和深度学习算法，高效准确地检测和分选种子，提高了分选效率，降低了人工成本，减少了误检和漏检[7]。

目前，基于可见光成像的机器视觉技术已应于水稻、玉米、小麦和蔬菜种子等的质量检测[8-10]。已有研究利用机器视觉对大米外观品质进行分级，将大米分为精米、碎米、垩白米，系统分级速度（以样品记）为30个/s[11]。张晗等[12]研制了一套在线式玉米单粒种子检测分选装置，采用基于机器视觉的图像采集和处理方式，用传感器对种子进行实时跟踪，破损种子分选准确率达到89%以上。然而，目前利用多光谱成像及机器学习技术对种子的质量检测仍处于研究阶段，尚未出现高通量筛选以及商业化的应用。

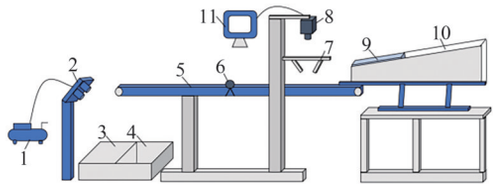
为弥补市场空缺，本研究拟基于RGB和近红外高分辨率多光谱成像技术设计开发一套智能种子分选机，采用机器视觉对种子的外观性状，包括色泽、形状、大小、纹理、质地等进行综合分析和判断，实现对种子的精准分选，以期为种子分选机的智能设计提供方案。

1　智能种子分选机硬件系统设计

1.1　智能种子分选机总体设计及工作原理

本研究智能种子分选机主要由控制系统、传输系统、供料系统、图像采集系统、种子筛选系统组成。智能种子分选机硬件结构包含空气压缩机、直动式电磁阀组、优质种子箱、劣质种子箱、传送带、编码器、线性光源、线扫描相机、电磁振动供料器、多级种子分隔装置、上位机等部分（图1）。

智能种子分选机工作流程见图2。启动上位机、空气压缩机，开启线性光源，线扫描相机，顺次启动传送带、电磁振动供料器，电磁振动供料器中的待分选种子经振动通过多级种子分隔装置后，在传送带上形成排列均匀的多条种子流，利用线扫描相机对经过的种子进行图像采集，上位机对采集到的种子图像进行滤波去噪、对比度增强、灰度化、二值化等预处理分析，然后目标检测模型对种子的色泽、形状、大小、纹理、质地进行分析，判定种子为优质种子或者劣质种子。若种子为优质则继续传送进入优质种子箱，若种子为劣质则由上位机将每次识别结果以二进制方式发送至PLC信息储存模块，PLC通过精准调控直动式电磁阀组将劣质种子吹出并投入劣质种子箱中。



1. 空气压缩机；2. 直动式电磁阀组；3. 优质种子箱；4. 劣质种子箱；5. 传送带；6. 编码器；7. 线性光源；8. 线扫描相机；9. 电磁振动供料器；10. 多级种子分隔装置；11. 上位机

1. Air compressor; 2. Direct motion solenoid valve set; 3. High quality seed box; 4. Inferior seed box; 5. Conveyor belt; 6. Encoder; 7. Linear light source; 8. Line scanning camera; 9. Electromagnetic vibration material feeder; 10. Multistage seed separation device; 11. Upper position machine

图1　智能种子分选机硬件结构

Fig. 1　Hardware structure of the intelligent seed sorting machine

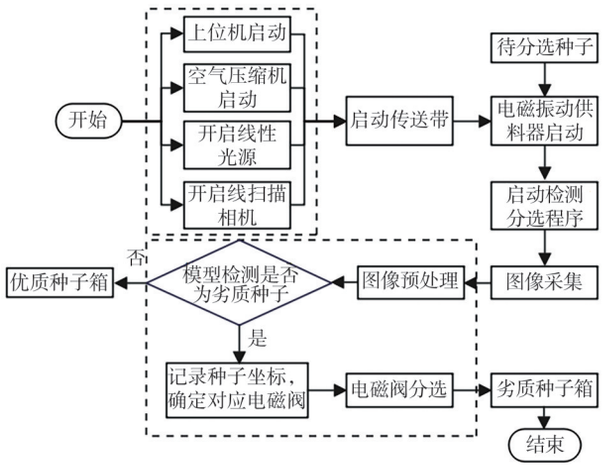
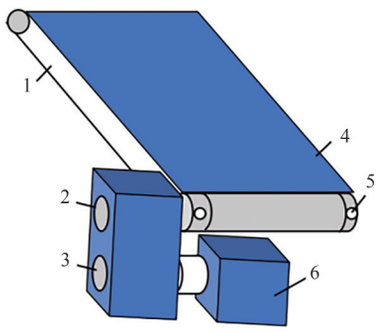


图2　智能种子分选机工作流程

Fig. 2　Flow chart of the intelligent seed sorting machine

1.2 传输系统设计

传输系统选用SPQ01带防跑偏肋内置驱动型传送带，其将驱动装置安装在机身型材内部，使传输系统的整体高度大幅减少。传输系统主要由机架、惰轮、同步轮、传送带、拉紧装置、驱动装置等组成(图3)。



1. 机架；2. 惰轮；3. 同步轮；4. 传送带；5. 拉紧装置；6. 驱动装置

1. Rack; 2. Idler; 3. Synchronous wheel; 4. Conveyor belt; 5. Tension device; 6. Drive device

图3 传输系统结构图

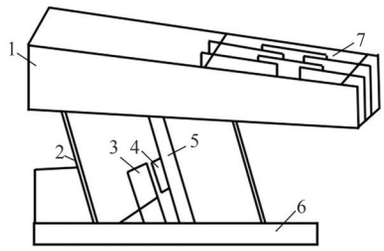
Fig. 3 Structure diagram of the transmission system

由于线扫描相机视角范围为±25°，距传送带300 mm，计算得到传送带宽度为279.78 mm。本研究单张图像的模型检测时间为0.24 s，种子筛选时间为0.3 s，考虑到传送带颜色与种子自身颜色差异对图像分析、处理的影响，同时为保证种子模型检测准确性和分选效率，选用宽度为280 mm、长度2 000 mm的蓝色传送带，提高被测种子与传送带的颜色对比度，减少种子轮廓上的虚边，便于种子和背景分离与种子图像识别工作[13-15]。

1.3 供料系统设计

为确保种子在后续图像采集、检测和分选处理中能够以单粒、有序的方式排列在传送带上，供料系统采用电磁振动供料器。电磁振动供料器主要由料斗、板簧、电磁铁、线圈、衔铁、底座、多级种子分隔装置及其他电子辅助装置等组成(图4)。

本研究系统试验时采用'郑丹958'玉米种子为分选研究对象，种子长为10～18 mm，宽10～15 mm，考虑到种子具有易聚集、易相连的特性[16]，为避免因种子密集排列导致后续图像分析处理困难，降低系统识别准确率，本研究在电磁振动供料器的出种口处设计了一种使种子排序上料的多级种子分隔装置(图5)：根据玉米种子的三维特征参数，该装置的每条缝隙



1. 料斗；2. 板簧；3. 线圈；4. 电磁铁；5. 衔铁；6. 底座；7. 多级种子分隔装置

1. Hopper; 2. Plate spring; 3. Coil; 4. Electromagnet; 5. Armature; 6. Base; 7. Multistage seed separation device

图4 电磁振动供料器结构图

Fig. 4 Structure diagram of the electromagnetic vibration material feeder

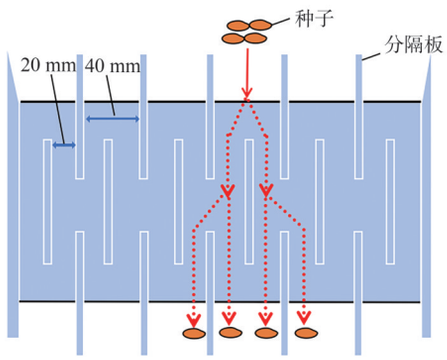


图5 多级种子分隔装置

Fig. 5 Multistage seed separation device

宽度设计为20 mm，同一时刻只有1粒种子通过，使种子分散排列。

1.4 图像采集系统设计

1.4.1 图像采集系统搭建

为精确拍摄传送带上快速运动的种子，本研究选用丹麦JAI品牌LQ-201-CL-F型号的线扫描相机，其拍摄速度最高为33 014行/s，该相机采用CMOS图像传感器作为感光元件，并支持采集RGB和NIR图像，相机的数据接口为Camera Link型，分辨率为4像素×2 048像素。

为增大光照强度，选取2个线型光源；为减少对种子影响，将光源架设在传送带上方50 mm处，并使光源照出的光汇聚在传送带上形成1条亮线，亮线垂直于相机镜头，以最大限度地增加进入相机镜头的光线。线扫描相机视角范围为±25°，传送带宽为280 mm，通过预试验方案，兼顾分选效率和图像采集精度，相机镜头距离传送带的距离为300 mm。线扫描相机的工作原理以及光源搭建见图6。

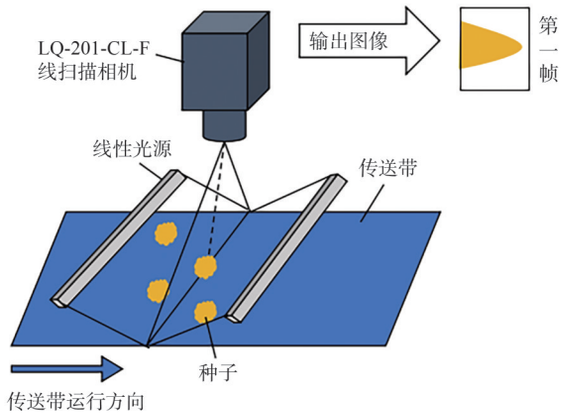


图 6　线扫描相机工作原理及光源搭建

Fig. 6　Working principle of line scanning camera and light source construction

1.4.2　编码器

编码器与多光谱图像采集装置连接，具有外部触发相机采集图像的功能。本研究应用转轮编码器使传送带的移动速度与线扫描相机的采样速率达到同步。为避免所扫描拍摄的图像失真变形，使横向像素精度等于纵向像素精度[17-18]。本研究选用幅宽为 280 mm 的传送带，设置种子图像分辨率为 2 048 像素×2 048 像素，根据式(1)，计算出横向像素精度为 0.14 mm。为了避免图像失真变形，根据式(2)和(3)，纵向像素精度也应为 0.14 mm。

$$p_1=\frac{L_0}{H_c} \tag{1}$$

$$p_2=\frac{(v\times T_0)}{(v_c\times T_c)} \tag{2}$$

$$\frac{L_0}{H_c}=\frac{v}{v_c} \tag{3}$$

$$T_0=T_c$$

式中：p_1 为横向像素精度，mm；L_0 为传送带幅宽，mm；H_c 为线扫描相机的单位像素数；p_2 为纵向像素精度，mm；v 为传送带运行速率，mm/s；v_c 为线阵相机线扫描速率，mm/s；T_0 为扫描 1 帧图像传送带运行的时间，s；T_c 为扫描 1 帧图像线扫描相机的扫描时间，s。

本研究选用欧姆龙 E6B2-CWZ1X 转轮编码器，转轮周长为 200 mm，旋转 1 圈输出 2 500 脉冲。当转轮旋转 360°在传送带上走过 200 mm 长度的时间内，线扫描相机需要扫描 1 429 条图像，纵向精度才能达到 0.14 mm，即当转轮转过 0.252°时编码器才能发出 1 次脉冲；而编码器自身发出 1 次脉冲需要转轴旋转 0.144°，意味着转轮转过约 0.252°时编码器已发出了 2 次脉冲信号到采集卡，这就需要对多光谱图像采集装置的接收信号进行 2 倍分频设置，使多光谱图像采集装置每收到 2 个来自编码器的脉冲信号触发线扫描相机扫描 1 条图像，这样就能保证图像纵向像素精度的准确。

1.5　种子筛选系统设计

1.5.1　PLC 和电磁阀组

电磁阀分为直动式、分步直动式、先导式三大类[19]。本研究采用亚德客 3 V 系列 3V210-08-NC 二位三通型常闭直动式电磁阀组，电磁阀组由 2 排直动三位二体常闭式电磁阀构成，整体长度为 280 mm，与传送带宽度适配，同时单个电磁阀组具有 12 个吹气装置，可由 PLC 的直流数字输出口分别连接电磁阀接线端子，实现对每个电磁阀的独立控制。其驱动电压为 DC24 V，功率 3.0 W，适用压强范围在 0.16～0.8 MPa，最高动作频率为 10 Hz。

在种子筛选系统中，为了快速控制直动式电磁阀组开闭以去除劣质种子，应选择晶体管输出类型的 PLC 以满足系统快速响应和高动作频率的需求[20]。因此选用西门子 S7-200 系列中的 SIMATIC S7-200 CN，CPU224XP 设备，NPN 型输出，输出端子类型为晶体管型。

种子筛选系统由空气压缩机提供气源，电磁阀组上的进气孔与空气压缩机连接，吹气孔对准传送带的筛选端。直动式电磁阀组上各个电磁阀出气孔之间存在 10 mm 的间隔，这一间隔称为分选盲区(图 7)。当系统识别出的劣质种子处于分选盲区时，单个电磁阀组吹出的气体很难将其分选出去。由于电磁阀出气口直径为 10 mm，选择将 2 个电磁阀组上下错位 10 mm 安装，下排电磁阀组出气孔之间的盲区由上排电磁阀的出气孔代替，从而有效地防止劣质种子漏选现象发生。

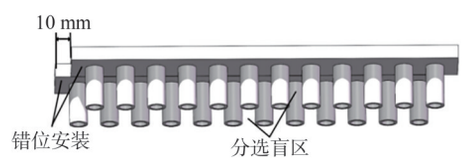


图 7　直动式电磁阀组示意图

Fig. 7　Schematic diagram of the direct-action solenoid valve set

1.5.2　种子筛选系统工作原理及试验

图 8 为种子筛选系统原理图。工作过程中，传送带送来的劣质种子会在离开传送带后被电磁阀气吹

式执行机构吹到右边的劣质种子箱中，而优质种子在离开传送带后作平抛运动落入左边优质种子箱中。

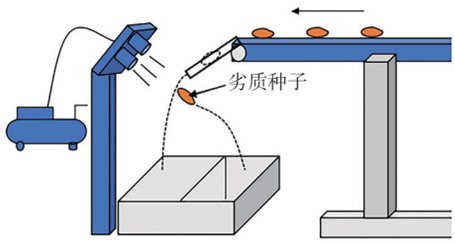
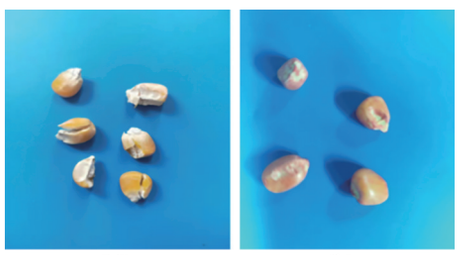


图8 种子筛选系统原理图

Fig. 8 Schematic diagram of the seed-screening system

以玉米种子为研究对象，经人工敲击、发霉等处理制作50组劣质玉米种子样本进行试验，人工碎种和霉变种样本见图9。试验时，对不同气泵压力值下种子飞出距离进行测量记录结果见表1。在试验中，气泵压力达到最大0.7 MPa时，种子最远可吹出3 m。当气泵压力值调到0.3 MPa时，种子斜抛的最远距离为1.0 m，平均距离0.67 m，大于优质种子箱长度，符合将劣质种子吹入劣质种子箱的智能种子分选机的分选距离要求。



(a) (b)

图9 人工碎种(a)和霉变种(b)样本

Fig.9 Samples of artificial seed (a) and mildew seed (b)

表1 气泵各压力值下吹选出种子的距离

Table 1 Air pump under the pressure of the furthest distance selected seeds

气泵压力/MPa Air pump pressure	最远距离/m Longest distance	平均距离/m Average distance
0.2	0.5	0.35
0.3	1.0	0.67
0.4	1.5	1.13
0.5	1.9	1.54
0.6	2.6	2.12
0.7	3.0	2.45

1.5.3 空气压缩机的选取

由于种子筛选系统分选的种子属于小质量物体，所需吹力较小，本研究选用压缩机功率为900 W，最高压力为0.7 MPa，最大排气量90 L/min的奥突斯无油静音型空气压缩机。

2 智能种子分选机软件控制系统设计

2.1 传输系统软件控制模块

传输系统软件控制模块用于高精度控制传送带转速、停止位置和力矩等参数。由于传送带做轻负荷的循环转动，输送小体积、轻重量的种子，不需要关注传送带的停止位置和力矩，只需计算伺服电机的转速即可。

在系统中，伺服电机驱动滚筒的圆截面周长约为62.8 mm。当伺服电机转动1圈时，带动传送带移动62.8 mm。为使传送带运行速率为800 mm/s，需要使伺服电机每秒转动约12.7圈。根据式(4)，控制器脉冲频率为3 175 Hz。

$$P=\frac{v}{L\times Z}\times C \tag{4}$$

式中：P为控制器脉冲频率，Hz；L为滚筒圆截面周长，mm；Z为电子齿轮比；C为编码器分辨率。

不同的传送带运行速率所需控制器发出的脉冲频率见表2。确定运动控制器的脉冲频率后，首先对变速控制器的参数进行设置，将X轴脉冲频率指令设置为3 175 Hz，并重复执行此条指令。对指令进行保存，选择指令文件，即可自动运行程序指令。当不需要传送带工作时，点击停止按钮。

表2 不同的传送带运行速率(v)所需控制器脉冲频率(P)

Table 2 Different conveyer belt transmission speeds (v) are required for the controller pulse frequency (P)

v/(mm/s)	P/Hz
600	2 400
700	2 775
800	3 175
900	3 575
1 000	4 000

2.2　图像采集系统软件控制模块

2.2.1　多光谱图像处理软件

本研究结合相机控制软件和多光谱图像采集装置控制软件的功能，设计了多光谱图像处理软件，使用 Pycharm 软件上的 python 语言编译而成。

多光谱图像处理界面软件能够根据自动采集到的RGB图片和NIR图片文件确定种子所在位置，根据图像处理算法进行种子质量识别，实现种子的自动分类和分选。同时对种子进行标注框选，并记录劣质种子二维坐标，为种子筛选提供前置条件。多光谱图像处理流程见图10。

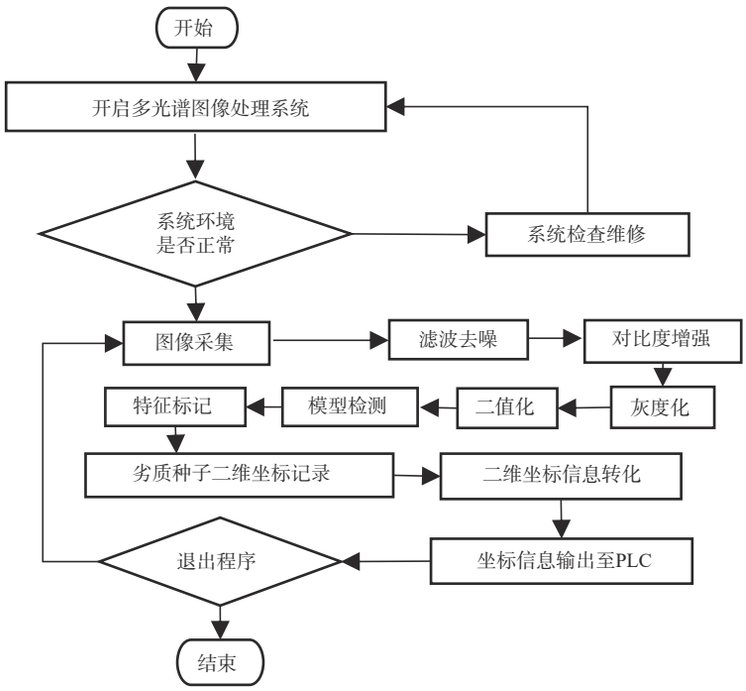


图 10　多光谱图像处理流程图

Fig. 10　Flow chart of the multispectral image processing

2.2.2　模型检测及试验

本研究对960个种子样本（优质、劣质种子分别为824和136个）通过网络模型进行种子优劣检测，对检测结果进行分选试验，种子模型检测及试验结果见表3，网络模型对优质、劣质种子检测的识别率分别为93.69%和91.91%，劣质种子检测的识别率比优质种子的偏低。对优质、劣质种子的测试集进行分选检测，得出种子分选率为89.6%。平均每检测1张图像耗时0.24 s。

表 3　种子模型检测及试验结果

Table 3　Seed model detection and testing results

种子种类 Seed type	测试集识别数/粒 Number of test sets identified	种子分选数/粒 Seed sorting	测试集识别率/% Test set identification rate	种子分选率/% Seed sorting rate	每张耗时/s Each piece takes time
优质 High quality	772	112	93.69	89.6	0.24
劣质 Inferior	125		91.91		

2.3　种子筛选系统软件控制模块

2.3.1　PLC 控制程序设计

西门子 S7-200 的编程软件采用支持 Windows 系统的 STEP7-Micro/WIN V4.0 SP9。PLC 控制程序调节控制电磁阀的开启、关闭，图像处理算法检测种子图像，得到优质、劣质种子的位置坐标，并

将坐标信息发送至SIMATIC S7-200 CN的储存模块，自动识别劣质种子的X、Y坐标并分别匹配与之对应的电磁阀位置。计算机采用RS-485与SIMATIC S7-200 CN进行自由端口通信，SIMATIC S7-200 CN将接收到的计算机指令中的电磁阀位置信息和控制字节储存到存储区，储存完成后，SIMATIC S7-200 CN向计算机反馈信息的同时在编译程序作用下根据计算电磁阀对种子开始吹气的时间(T)使用延时指令做倒计时，控制电磁阀开启吹选出劣质种子，随后再使用延时指令做0.5 s倒计时，断开控制，电磁阀关闭，完成种子分选。SIMATIC S7-200 CN控制程序见图11。SIMATIC S7-200 CN不断控制各个小电磁阀吹气孔的开启、关闭，形成断续吹出的气流，吹选出传送带上对应存在的劣质种子。

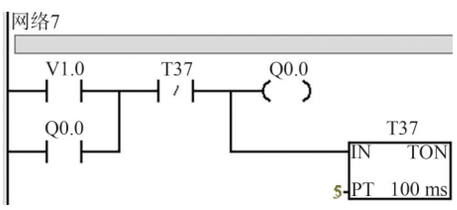


图11 SIMATIC S7-200 CN控制程序图

Fig. 11 Diagram of SIMATIC S7-200 CN control program

对于SIMATIC S7-200 CN控制多个电磁阀只需对该部分程序进行叠加，分配好SIMATIC S7-200 CN的直流数字输出口即可。

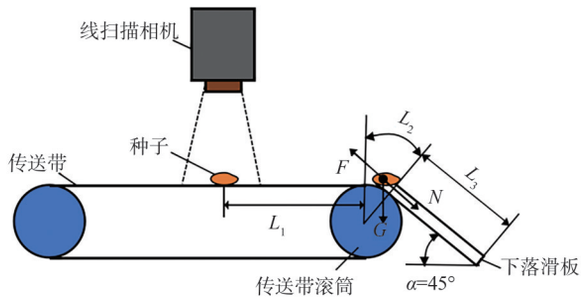
2.3.2 种子筛选系统控制时间分析计算

为保证种子能被准确分选，需对开启电磁阀进行气动分选的时间进行计算。种子筛选系统获得目标检测模型对图像的检测结果，使用SIMATIC S7-200 CN分选模块进行控制，当判别种粒为劣质种子时，计算电磁阀对种子开始吹气的时间T，对种子完成精准分选。种子在传送带上的运动及受力分析见图12。

种子从图像采集区域到分选位置的运动过程可分为种子在线扫描相机正下方到传送带滚筒中心正上方移动距离(L_1)、种子在传送带滚筒边缘处移动距离(L_2)和种子沿下落滑板滑落距离(L_3)3段。

在L_1段中，种子随传送带匀速的移动，运动时间T_1的计算公式为：

$$T_1=\frac{L_1}{v} \tag{5}$$



L_1为种子从相机镜头正下方到传送带滚筒中心正上方移动距离；L_2为种子在传送带滚筒边缘处移动距离；L_3为子沿下落滑板滑落距离；F为种子滑落过程所受阻力；G为种子滑落过程所受重力；α为下落滑板与水平面的夹角；N为种子滑落过程所受合力。

L_1 is the distance that the seed moves from directly below the camera lens to directly above the center of the conveyor roller; L_2 is the moving distance of the seed on the edge of the conveyor roller; L_3 is the sliding distance along the falling slide; F is the resistance of the seed slide process; G is the gravity of the seed slide process; α is the angle between the falling slide and the horizontal surface; N is the resultant force of the seed slide process.

图12 种子在传送带上的运动及受力分析

Fig. 12 The movement and force analysis of the seeds on the conveyor belt

在L_2段中，传送带与种子的摩擦力大于重力分量，因此种子会沿传送带匀速移动。运动时间T_2的计算公式为：

$$T_2=\frac{\pi R\alpha}{180v} \tag{6}$$

式中：R为传送带滚筒半径，mm/s；α为下落滑板与水平面的夹角，取α=45°，根据图12，利用相似三角形定理推知，种子在传送带滚筒上移动的角度也为45°。

在L_3段中，由于受到重力作用而作加速运动，加速度a和运动时间T_3的计算方公式如下：

$$a=g\sin\alpha-\mu g\cos\alpha \tag{7}$$

$$T_3=\frac{\left(\sqrt{1+\frac{2\alpha L_3}{v^2}}-1\right)v}{a} \tag{8}$$

式中：μ为下落滑板与种子的摩擦因数，本研究取μ=0.35；L_3为种子通过下落滑板长度，mm；g为重力加速度，mm/s^2。

计算出种子到达分选位置处所用的时间，再减去目标检测模型检测单粒种子所用的时间T_4，即可得到电磁阀对种子开始吹气的时间T。计算电磁阀对种子开始吹气的时间T的计算公式为：

$$T=T_1+T_2+T_3-T_4 \tag{9}$$

式中：T_4为目标检测模型检测每张种子所用的时间，0.24 s；T为电磁阀对种子开始吹气的时间，s。

3 结　论

本研究基于RGB和近红外高分辨率多光谱成像技术设计并开发了一套智能种子分选机，主要设计了传输系统、供料系统、图像采集系统、种子筛选系统和控制系统。智能种子分选机能通过采集种子图像并利用目标检测模型对种子的色泽、形状、大小、纹理、质地等特征进行综合分析和判断，进而确定种子的优劣，并通过气吹式执行机构实现种子分选。

以‘郑丹958’玉米种子为研究对象，对种子分选机进行了气泵压力值和控制器脉冲频率试验，以优化种子气流下斜抛的水平距离和传送带的速度。试验结果表明，最佳参数组合气泵压力值为0.3 MPa，控制器脉冲频率为3 175 Hz。利用960个种子样本（优质、劣质种子分别为824和136个）选用目标检测模型进行种子质量检测，得出优质种子识别率为93.69%，劣质种子识别率为91.91%；利用最佳参数组合进行了玉米种子分选试验，种子分选率为89.6%。分选机能够有效满足种子分选要求。

参考文献　References

[1] 段宇飞，皇甫思思，王焱清，汤旸，霍俊．基于机器视觉的油茶果果壳与茶籽分选方法研究[J]．中国农机化学报，2020，41(6)：171-178
Duan Y F, Huangfu S S, Wang Y Q, Tang Y, Huo J. Sorting method of seeds and shells of the camellia oleifera fruit based on machine vision[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(6): 171-178 (in Chinese)

[2] 陈满，倪有亮，金诚谦，徐金山，张光跃．基于机器视觉的大豆机械化收获质量在线监测方法[J]．农业机械学报，2021，52(1)：91-98
Chen M, Ni Y L, Jin C Q, Xu J S, Zhang G Y. Online monitoring method of mechanized soybean harvest quality based on machine vision[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(1): 91-98 (in Chinese)

[3] Jiang P, Chen Y H, Liu B, He D J, Liang C Q. Real-time detection of apple leaf diseases using deep learning approach based on improved convolutional neural networks[J]. *IEEE Access*, 2019(7): 59069-59080

[4] 程莹，许亚男，侯浩楠，宁翠玲，杨成民，董学会，曹海禄，孙群．基于机器视觉技术的小粒中药材种子净度快速检测[J]．中国农业大学学报，2022，27(5)：114-122
Cheng Y, Xu Y N, Hou H N, Ning C L, Yang C M, Dong X H, Cao H L, Sun Q. Rapid small seed clarity detection method of Chinese medicinal plants based on machine vision technology [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(5): 114-122 (in Chinese)

[5] 孙进，张洋，王宁，张道周，丁煜，习俊通．融合机器视觉和CAN总线的玉米种粒分类器设计与试验[J]．中国农机化学报，2020，41(8)：81-89, 120
Sun J, Zhang Y, Wang N, Zhang D Z, Ding Y, Xi J T. Design and experiment of corn seeds classifier based on machine vision and CAN bus[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(8): 81-89, 120 (in Chinese)

[6] 刘忠超，盖晓华．基于机器视觉和PLC的猕猴桃分级控制系统设计[J]．中国农机化学报，2020，41(1)：131-135
Liu Z C, Gai X H. Design of kiwifruit grading control system based on machine vision and PLC[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(1): 131-135 (in Chinese)

[7] 刘媛杰，张泽亮，张洪洲，李勇，李伟强．基于机器视觉技术的棉籽破损检测[J]．中国农机化学报，2022，43(5)：71-76
Liu Y J, Zhang Z L, Zhang H Z, Li Y, Li W Q. Detection of cottonseed damage based on machine vision technology [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(5): 71-76 (in Chinese)

[8] 方雨，李大寨，林闯．基于机器视觉的传送带分拣技术研究[J]．机械工程与自动化，2018(6)：173-175
Fang Y, Li D Z, Lin C. Research on sorting conveyor technology based on machine vision[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2018(6): 173-175 (in Chinese)

[9] Chen Y H, An X S, Gao S M, Li S J, Kang H W. A deep learning-based vision system combining detection and tracking for fast on-line citrus sorting[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021(12): 622062

[10] 祝诗平，卓佳鑫，黄华，李光林．基于CNN的小麦籽粒完整性图像检测系统[J]．农业机械学报，2020，51(5)：36-42
Zhu S P, Zhuo J X, Huang H, Li G L. Wheat grain integrity image detection system based on CNN[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(5): 36-42 (in Chinese)

[11] 程科，黄文雄，谢健，郭亚丽，周娜，潘庆华，曹梅丽，郭亦凡，戴智华，王彪，金刚强．基于机器视觉的大米加工品质在线检测系统[J]．现代食品，2022，28(10)：9-11, 22
Cheng K, Huang W X, Xie J, Guo Y L, Zhou N, Pan Q H, Cao M L, Guo Y F, Dai Z H, Wang B, Jin G Q. On-line inspection system of rice processing quality based on machine vision [J]. *Modern Food*, 2022, 28(10): 9-11, 22 (in Chinese)

[12] 张晗，闫宁，吴旭东，王成，罗斌．在线式玉米单粒种子检测分选装置设计与试验[J]．农业机械学报，2022，53(6)：159-166
Zhang H, Yan N, Wu X D, Wang C, Luo B. Design and experiment of online maize single seed detection and sorting device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(6): 159-166 (in Chinese)

[13] 张伏，张朝臣，陈自均，滕帅，徐锐良．光谱检测技术在种子质量检测中的应用[J]．中国农机化学报，2021，42(2)：109-114
Zhang F, Zhang C C, Chen Z J, Teng S, Xu R L. Application of spectral testing technology in seed quality testing [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(2): 109-114(in Chinese)

[14] 倪云峰，叶健，樊娇娇．基于图像识别的水果分拣系统[J]．江苏农业科学，2021，49(10)：170-176
Ni Y F, Ye J, Fan J J. Fruit sorting system based on image recognition[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(10): 170-176 (in Chinese)

[15] 傅隆生，冯亚利，Elkamil Tola，刘智豪，李瑞，崔永杰．基于卷积神经网络的田间多簇猕猴桃图像识别方法[J]．农业工程学报，2018，34(2)：205-211
Fu L S, Feng Y L, Tola E, Liu Z H, Li R, Cui Y J. Image recognition method of multi-cluster kiwifruit in field based on convolutional neural networks [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(2): 205-211 (in Chinese)

[16] Wang L B, Liu J Y, Zhang J, Wang J, Fan X F. Corn seed defect detection based on watershed algorithm and two-pathway convolutional

neural networks[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022(13): 730190

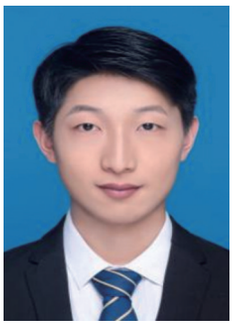
[17] 侯占峰,张曦文,陈智,戴念祖,马学杰,刘敏. 丸粒化包衣种子识别检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022,53(6):62-69, 183
Hou Z F, Zhang X W, Chen Z, Dai N Z, Ma X J, Liu M. Design and experiment of identification and detection system for pelleted coated seeds[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(6): 62-69, 183 (in Chinese)

[18] 赵映川. 编码器原理与应用分析[J]. 无线互联科技, 2018,15(22):67-69, 78
Zhao Y C. Analysis on the principle and application of encoder device[J]. *Wireless Internet Technology*, 2018, 15(22): 67-69, 78 (in Chinese)

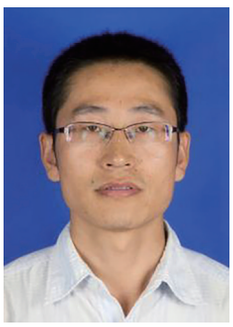
[19] 范晓飞,王林柏,刘景艳,周玉宏,张君,索雪松. 基于改进YOLO v4的玉米种子外观品质检测方法[J]. 农业机械学报, 2022,53(7):226-233
Fan X F, Wang L B, Liu J Y, Zhou Y H, Zhang J, Suo X S. Corn seed appearance quality estimation based on improved YOLO v4 [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(7): 226-233(in Chinese)

[20] 孟繁佳,罗石,孙红,李民赞. 玉米种子实时检测分选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021,52(3):153-159, 177
Meng F J, Luo S, Sun H, Li M Z. Design and experiment of real-time detection and sorting device for maize seeds [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(3): 153-159, 177 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 封玉搏,河北农业大学机电工程学院硕士研究生,农业机械化工程专业。在校期间获得校二等奖学金2次,获得中国研究生乡村振兴科技强农+创新大赛乡村振兴志愿服务技能大赛校级二等奖,申请专利2项,登记计算机软著3项,参与国家级研究项目1项,省部级研究项目1项。



通讯作者简介: 赵晓顺,博士,副教授,美国堪萨斯州立大学生物与农业工程访问学者,河北省专精特新"小巨人"企业科技特派团成员。中国农业机械学会青年工作委员会第六届委员会副主任委员,中国农业机械学会编辑工作委员会第十一届委员会委员,《智能化农业装备学报(中英文)》第一届青年编委会委员。主持"十三五"国家粮食丰产科技工程子课题3项;主持省级项目5项,参研厅局级以上课题8项。在国内及国际期刊上发表论文100余篇,其中第一作者及通讯作者30余篇,SCI二区2篇,EI收录12篇;申请专利100余项,其中第一发明人47项,第一发明人发明专利授权9项,转化实施7项。