

转盘式板栗可见/近红外光谱检测分选系统研究

姜洪喆 谭 烽 李兴鹏 王大臣 蒋雪松 周宏平

(南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037)

摘要: 针对典型木本粮食板栗的现场非破坏快检分选需求, 基于可见/近红外光谱检测分析技术, 设计了转盘式板栗在线检测分选系统。该系统主要由上料单元、光谱采集单元、控制单元、分选单元和显示单元组成, 上料单元振动盘经试验确定最佳频率为 150 Hz, 并联合伺服电机对转盘进行驱动, 光谱采集单元以卤素灯为光源, 应用微型光谱仪采集光谱信息, 控制方案经对比后确定并行式执行方案, 基于 QT 平台及 C++ 语言开发单片机程序, 配合上位机开发的光谱采集软件, 实现了光谱信息采集、处理、显示存储以及分类, 分选执行机构采用电磁推杆带动挡板伸缩完成孔洞的开合。以迁西、丹东、玉溪板栗为对象, 采集光谱并对不同预处理方法分别建立产地与霉变的偏最小二乘判别 (Partial least squares discriminant analysis, PLS-DA) 模型, 交叉验证后产地模型预测集准确率为 97.12%、霉变模型预测集判别准确率为 94.74%。最后将模型植入系统软件后应用随机预测集板栗进行测试, 产地与霉变判别分选准确率分别为 93.83% 和 94.12%, 最优检测分选速度为 37 颗/min。结果表明, 本文设计的转盘式板栗检测分选系统效率高、采集稳定、检测准确率高, 具备快速实现不同产地以及霉变板栗无损检测分选功能。

关键词: 板栗; 转盘式; 分选装置; 无损检测; 可见/近红外光谱

中图分类号: S375 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)12-0462-08

OSID:



Research of Rotary Sorting System for Chestnuts Based on Visible/Near-infrared Spectroscopy

JIANG Hongzhe TAN Feng LI Xingpeng WANG Dachen JIANG Xuesong ZHOU Hongping
(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: There is a certain demand to carry out the on-site rapid and non-destructive detection and sorting of typical woody grain, i. e. chestnuts. Based on visible/near-infrared spectroscopy and analysis technology, a rotary chestnut online detection and sorting system was developed. This system mainly consisted of a feeding unit, a spectral acquisition unit, a control unit, a sorting unit, and a display unit. The experiment of vibration disk in the feeding unit determined that 150 Hz was the optimal frequency, and a servo motor was connected to drive the disk. The halogen lamps were used as light sources and a micro-spectrometer was used to collect spectral information in the spectral acquisition unit. After comparison, a parallel control plan was determined in the control unit. Based on the QT platform and C++ language, a microcontroller program was developed. The program combined with the developed spectral acquisition software for the upper computer was used to achieve the collection, processing, display, storage, and discrimination of spectral information. The electromagnetic push rod was applied to drive the expansion and contraction of the baffle to complete the opening and closing of the hole. Chestnuts from Qianxi, Dandong, and Yuxi were selected as experimental samples, spectra were collected and spectral preprocessing methods were applied to establish partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) models for comparison. The PLS-DA models for geographical origins and mildew discrimination were developed, respectively. The correct classification accuracy of the model for

收稿日期: 2024-07-14 修回日期: 2024-09-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32102071)、中国博士后科学基金项目 (2023M741724)、江苏省农业科技自主创新资金项目 (CX(24)3051) 和江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目 (202410298018Z)

作者简介: 姜洪喆 (1989—), 男, 副教授, 博士, 主要从事农林产品智能检测技术与装备研究, E-mail: jianghongzhe@njfu.edu.cn

通信作者: 周宏平 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事林业机械及其智能化研究, E-mail: hpzhou@njfu.edu.cn

geographical origins in prediction set was 97.12%, and it was 94.74% of the model for mildew discrimination. The optimal detection and sorting efficiency was to process 37 samples per minute by this device. Finally, the models were individually implanted into the system software, and random prediction sets of chestnuts were used for tests. The correct classification accuracies of the models for geographical origins and mildew discrimination achieved 93.83% and 94.12%, respectively. The results indicated that the designed rotary detection and sorting system and device presented high efficiency, stable collection, and high detection accuracy. It was feasible to quickly achieve the goal of non-destructive detection and sorting of chestnuts from different geographical origins and mildew or not.

Key words: chestnuts; rotary way; sorting device; non-destructive detection; visible/near-infrared spectroscopy

0 引言

随着国民消费水平的提高和膳食结构的调整,以板栗(*Castanea mollissima* Blume)为代表的木本粮食深受青睐^[1]。我国既是板栗生产大国,又是板栗出口大国,当前产业正提升采后标准化处理水平,研发现代化智能检测分级装备,增加出口创汇^[2]。目前产业存在的主要问题,一是不同产地板栗口感、营养价值存在显著差异,存在冒充知名产地以次充好问题^[3-4],二是贮藏不当发生自然霉变的板栗导致的食品安全问题^[5]。传统检测方法主要依靠感官分析、高效液相色谱(High-performance liquid chromatographic, HPLC)^[6-7]、薄层色谱法(Thin layer chromatography, TLC)^[8]以及化学试剂滴定^[9]等,但检测指标单一、具有破坏性、效率低且试剂不环保,不利于实时快速现场检测,因此,研究板栗不同产地与自然霉变判别的快速、无损检测方法的分选系统十分必要。

可见/近红外光谱(Visible/near-infrared spectroscopy, Vis/NIRS)分析技术具有检测速度快、样品前处理少、非破坏、无污染、同时获取多品质参数等优势^[10-11],广泛应用于肉类^[12]、粮食^[13-14]、球形果蔬^[15-17]等的无损检测和分选装置开发中。国内外针对板栗进行室内可控光源环境下近红外光谱检测的相关研究已有一定前期基础^[18-20],但针对不同产地以次充好、霉变板栗混入等场景,相关实际应用的分选系统还少有研究。

本文基于可见/近红外光谱分析技术,结合化学计量学方法,以多个产地以及霉变板栗为研究对象,提出一种逐颗快速检测方法,建立产地及霉变定性判别模型植入分析控制软件,研发一套转盘式检测分选系统。最终完成对系统优选参数与检测分选准确性的验证,以期对相关木本粮油林果品质的非人工实时检测分选提供方法与技术支持。

1 系统软硬件设计

1.1 整机结构设计

转盘式板栗在线检测分选系统整体如图 1 所示,由上料单元、光谱采集单元、控制单元、分选单元、显示单元等组成。硬件主要包括开关电源、伺服驱动器、伺服电机、光谱仪、电磁推杆、光电开关、电感开关、卤素灯光源、上位机、单片机以及继电器等。工作状态板栗由上料单元逐颗排列后输送至转盘,转盘带动单颗板栗旋转至光谱采集单元进行光谱采集与检测,控制单元控制上料启停、转盘转动并根据计算机模型预测结果控制落料孔洞的开合,显示单元实时显示单片机及光谱仪软件界面数据,分选单元执行机构动作使板栗准确落入对应收集箱,完成板栗快检分选。



图 1 板栗在线检测分选系统实物图

Fig. 1 Physical diagram of on-line detection and sorting device for chestnuts

1. 光谱采集单元 2. 分选单元 3. 上料单元 4. 控制单元 5. 显示单元

1.2 上料单元

板栗形状不规则,负压吸附上料极易卡果或脱果,对比分析后采用电磁振动式上料,该单元主要由振动盘和数字调压控制器组成。振动盘包含料斗、底座和导槽,导槽入口处设置可调挡片,可随板栗大小调节以保证单排逐颗通过,选用南京创优科技有限责任公司生产的 SDVC20-S 型数字调压控制器控制上料单元启停。综合考虑我国大部分产地板栗的尺寸、形状因素,落料转盘上每个孔设计为直径 4 cm 的圆孔,每孔能且仅能容纳一颗板栗落入。

1.3 光谱采集单元

光谱采集单元需兼顾发光波长范围、强度以及稳定性,选取可覆盖光谱波段 200 ~ 2 500 nm 的欧司朗公司 41835FL 型卤素灯做光源,额定电压和功率分别为 12 V 和 50 W、色温 2 950 K 且光通量达 510 lm。可见/近红外光谱仪作为核心部分对系统实用性、准确性、稳定性及经济性影响较大,选用北京简谱科技有限公司研发的 JP - M10 型光谱仪,灵敏度高、体型小(110 mm × 90 mm × 52 mm)、谱域为 340 ~ 990 nm、质量 400 g,封装工艺抗湿性能强且成本低,可进行二次开发。

1.4 控制单元

控制单元的核心选用集成度高的意法半导体集团 STM32F407IGT6 型单片机,具有 168 MHz 工作频率的内核,显示单元的单片机软件界面如图 2 所示,交互选项卡的电机参数区可以控制电机的转速、加减速时间、圈数,同时实时显示电机当前步数。调试区可手动开关分选电磁推杆以及振动盘,也集成了自动运行程序,点击运行即可根据实际情况开关上述硬件。伺服驱动器监视区主要监视电机是否报警,配置清除报警按钮。右侧为分选缓存结果显示区域,显示当前数据库中板栗的分选编号。

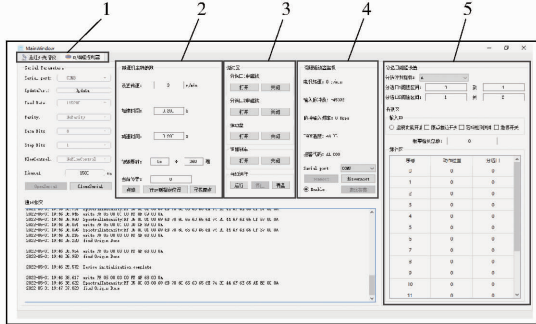


图 2 单片机软件操作界面

Fig. 2 Operation interface of singlechip software

1. 主选项卡
2. 电机参数区
3. 调试区
4. 伺服驱动器监视区
5. 分选缓存结果显示区

1.5 分选单元控制方案

转盘式检测台标识孔洞位置如图 3 所示,检测口和分选口镶嵌材料为透明亚克力板。0 号口为光电检测口,当光电传感器检测到该孔洞有板栗落入时给单片机信号,单片机将信号发送给伺服驱动器,电机驱动转盘逆时针方向旋转 1 个格;4 号口为近红外光谱检测口,8、16 和 23 号口为 3 个分选口。在分选三类板栗时,逻辑上只需要判断分选口 1 和分选口 2 是否开合,其余未从分选口 1 和分选口 2 排出的板栗均从分选口 3 排出。

对比不同方案后选定先读后存控制方案,核心思路是建立一个数据库,先读取电机当前步数,用电

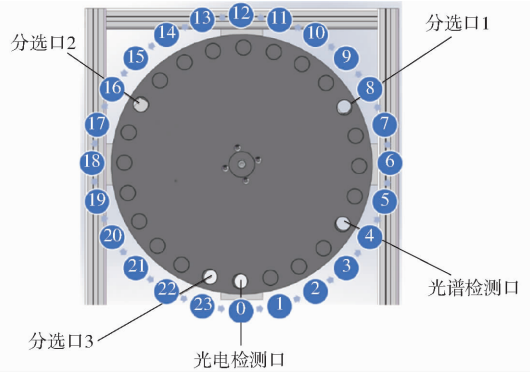


图 3 转盘式检测平台俯视图

Fig. 3 Top view of rotary detection bench

机当前步数去数据库内搜寻是否有相对应的动作位置(寻址),动作位置由电机步数与分选编号构成,分选编号由上位机计算然后分发,如果计算结果为从分选口 1 排出时,分配的分选编号为 4,如果计算结果为从分选口 2 排出时,分配的分选编号为 12,如果计算结果为从分选口 3 排出时,则无需分配相应的编号,因此也无需存入缓存数据库。图 4 为电机旋转至第 9 步的数据存储读取示意图。

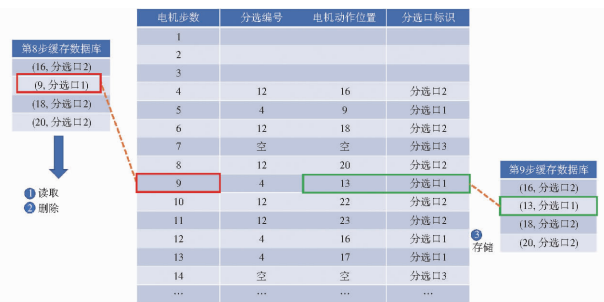


图 4 方案数据存储和读出示意图

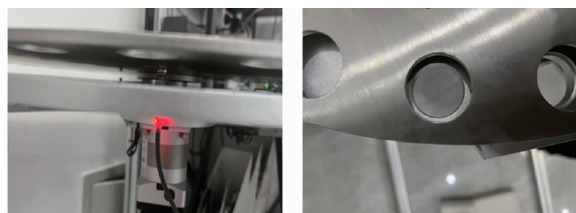
Fig. 4 Schematic of data storage and readout of scheme

控制方案执行时采用并行方式,缩短了程序执行时间,提高分选效率。在整个程序执行流程中,光谱采集的积分时间和光谱数据处理的时间较长,此种方案可先发出光谱采集指令,后立即进行电磁推杆的开合指令,电磁推杆完成分选动作后,数据库可以原地待命,直至上位机处理完数据,再将分选口编号存入数据库。

1.6 分选单元定位与驱动

采用欧姆龙 E2EX1R5F1 型电感式接近开关来判断转盘检测台是否处于原始位置,接近开关判断传感器与固定用螺丝位置关系,初次调整时需确保接近开关触发(图 5a)时转盘检测台的孔洞与分选口孔洞对齐(图 5b)。后续分选任务将以初次触发的位置作为起始点,执行分选任务前自动旋转检测盘,即螺丝与接近开关处于图 5a 位置时,而后接近开关将磁通量信号转化为电信号并向单片机发送处于原始位置的指令。另将欧姆

龙 E3Z-LL66 型光电式接近开关安装在落料孔侧方,用以检测落料口下方对应的落料孔上是否有板栗,本装置选用遮光时 on 模式,即正常情况下光电传感器为低电平信号,当检测到落料孔上有板栗时转变为高电平信号,同时将电平信号发送给单片机。



(a) 接近开关触发

(b) 分选口对齐

图 5 分选单元触发与对齐

Fig. 5 Triggering and alignment of sorting unit

分选单元选用台达公司 ECMA-C20604SS 型交流伺服电机驱动,低频抑振,可有效避免步进电机低速状态下的转盘抖动。为方便换算伺服脉冲数对应的旋转圈数,引入电子齿轮比使电机旋转一圈对应的脉冲数为能被 24(分选检测台孔洞数为 24) 整除的 1 800,使用者单位(Pos of user unit,PUU)为经过电子齿轮比单位,本文台达伺服驱动器分辨率为 160 000,电子齿轮比为 800/9,伺服驱动器中 P1-44 设置为 800,P1-45 设置为 9,经换算电机旋转一圈只需 1 800 个 PUU。

在检测板栗过程中,每一个回授脉冲对应旋转轴转动角 A 为 $360^\circ/1\ 800 = 0.2^\circ$,根据电机以上脉冲对应旋转轴转动角以及每次轮转所需的角度,计算出每次轮转所需的脉冲数,使伺服驱动器下发相应的脉冲指令。

1.7 分选单元执行机构

分选单元执行机构主要包括出料口、挡板、电磁推杆与继电器,整个系统由伊莱科公司 EML-1564B 型电磁推杆推拉带动,连接挡板产生伸缩运动,对应继电器接收单片机高电平信号时继电器吸合导通,电磁推杆电磁铁得电,推拉杆带动挡板缩回,板栗落下孔洞进入导管与收集箱。挡板一端与电磁推杆的螺杆连接、另一端置于检测台滑轨内,实际安装如图 6 所示。分选装置检测盘总共设有 5 个孔洞,其中 3 个孔洞用于板栗下落,即可以至多分选 3 个等级板栗,仅针对推拉挡板和电磁推杆配置 2 孔洞实现分选功能,最后一等级在前 2 孔洞未落下则在第 3 孔洞自然落下。

1.8 电路布局与构成

系统整体电路布局与构成示意图如图 7 所示,主要由强电(220 V AC)和弱电(12 V DC 和 24 V DC)网络构成,强电提供电力、弱电提供信号,

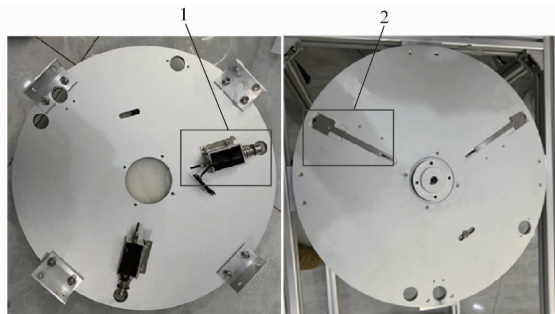


图 6 转盘式检测台电磁推杆与挡板安装

Fig. 6 Installation of electromagnetic push rod and baffle on rotary detection bench

1. 电磁推杆 2. 挡板

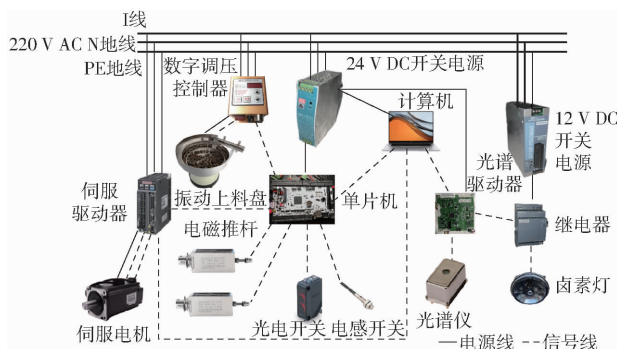


图 7 系统整体电路布局与构成示意图

Fig. 7 Schematic of overall circuit layout and composition of system

安装中弱电信号容易受强电干扰,强电和弱电分开布线。上料单元中振动盘和数字调压控制器通过高频振动实现板栗自动上料;光谱采集系统由光谱仪和光谱驱动器组成,其主体置于旋转检测台上方的暗箱内,实现板栗样本的光谱数据采集;控制单元主要由单片机和计算机作为上位机和下位机,用于光谱采集数据的处理以及分选动作信号的派发;分选单元伺服驱动是整个分选装置的核心,完成检测台的转动控制并反馈位移信息;分选单元定位装置主要由光电开关和电感开关组成,可以读取旋转检测台位置,实现板栗样本位置监控;分选单元执行机构由电磁推杆和继电器组成,通过控制检测台下方分选口的开合,实现对不同类别板栗分选。

1.9 光谱检测软件开发

软件应用 QT creator 4.11.1 集成开发,使用 C++ 语言编写,界面如图 8 所示。主程序包含近红外光谱仪交互以及单片机交互两个主选项卡,近红外光谱仪主选项卡设置光谱仪控制界面、模型管理界面以及历史数据查询界面 3 个子选项卡。光谱仪控制界面左侧为参数设置界面,左上角为通讯参数设置区域,可设置所用串口名称、波特率、奇偶校验、数据位、停止位以及数据流等通讯参数。左下角光谱采集参数设置区域可以进行背景校准以及设置单

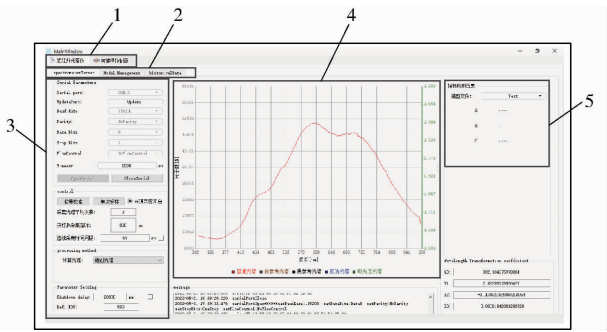


图8 光谱仪软件界面

Fig. 8 Software interface of spectrometer

1. 主选项卡
2. 子选项卡
3. 参数设置区域
4. 光谱显示窗口
5. 模型显示区域

个样本光谱采集次数、光谱积分时间、间隔时间。为便于获得校正样本集,加入单次采样按钮,可以实现单击采集光谱的功能。计算光谱处设置下拉菜单,提供“绝对光谱”、“吸收率”和“反射率”3种选项,采集的光谱曲线在光谱显示窗口中呈现^[21]。模型显示区域可以展示模型管理界面导入的建好模型,历史数据查询界面可以查询光谱保存数据,包括光谱采集时间、所用模型、不同波段下光谱数据、预测指标以及预测值。

2 板栗产地与自然霉变判别模型建立

2.1 试验材料

本试验所用板栗丰收季采收自河北省迁西、辽宁省丹东和云南省玉溪,而后剔除表面缺陷及虫蛀样本。为获取测试所需的自然霉变样本,随机称取

5 kg 按行业标准 LY/T 1674—2006 堆垛于温度 0 ~ 4℃、相对湿度 85% ~ 95% 的人工气候箱中,贮藏 20 d 后对板栗进行光谱采集,采集完成后的板栗对半切开,检验内部是否发生霉变,只要内部或外部有霉变则对相应的光谱打上霉变标签,否则不计入。另取 5 kg 堆垛放置于温度 10 ~ 20℃、相对湿度 30% ~ 70% 的常规仓储环境中,20 d 后采集光谱后切半,无霉变则光谱标注健康,三产地健康板栗光谱分别标注迁西、丹东和玉溪。

2.2 光谱数据采集

数据应用北京简谱科技有限公司开发的 JP-M10 型可见/红外光谱仪进行采集,首先取出板栗静置于室温(20℃)下 2 ~ 3 h,达到温度平衡,后将设备通电预热 30 min,在暗箱中采集白参考和暗电流用于黑白校正。在板栗的果腹、果背和果脐处逐一选取 3 个测点^[22],随后在配套软件中进行黑白校正和存储,积分时间设为 1 ms、扫描次数为 100、平滑度为 5,为减少误差将三测点平均光谱存储为该板栗的光谱数据。原始光谱曲线与平均光谱曲线如图 9 所示,可见不同类别样本光谱曲线变化趋势一致,板栗红棕色外观导致光谱在可见光波段反射率低而近红外区域反射率增加,不同类别总体反射率观测存在细微差异,需要结合化学计量学进行进一步分析。

2.3 预处理与建模方法

可见/近红外光谱易受到因素干扰,对原始光谱进行预处理可消除光谱中噪声并对散射引起的光谱

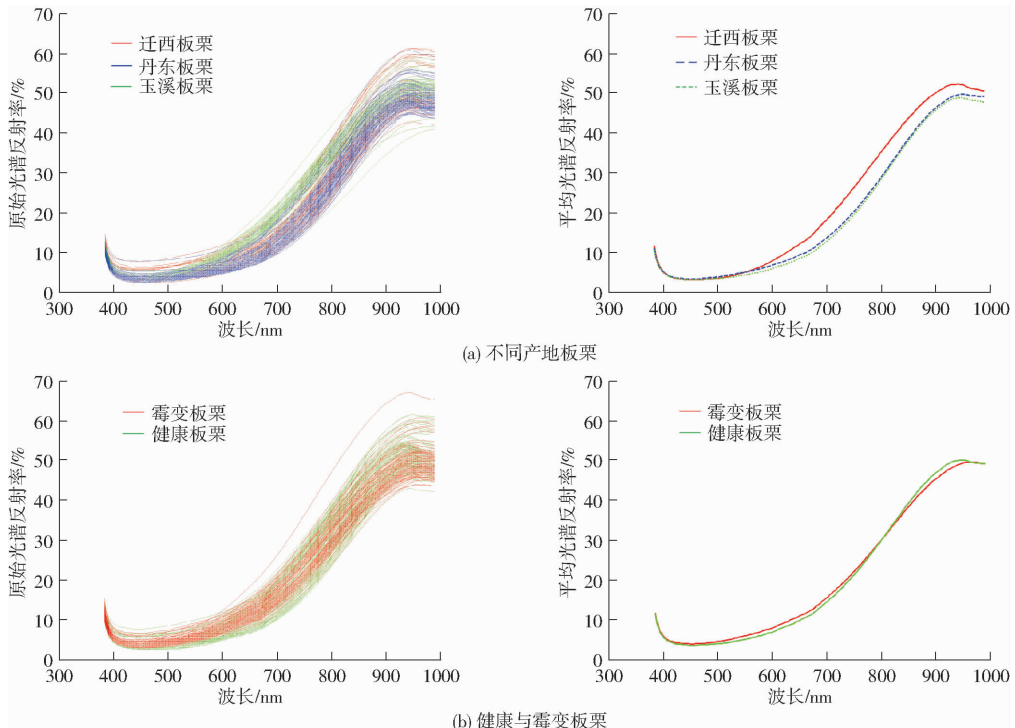


图9 采集的板栗样本反射光谱曲线

Fig. 9 Spectral curves in reflectance mode of collected chestnuts

误差进行校正^[23], 光谱预处理方式包括无预处理、以及对原始光谱进行标准正态变换 (Standard normal variate, SNV)、SNV + 去趋势 (Detrending)、标准化、一阶导数和二阶导数等 5 种预处理, 以降低基线漂移和散射效应^[24]。导数法参数设为 5 点 2 次函数的 Savitzky - Golay 卷积, 而后采用 PLS - DA 进行建模, 通过选择最佳潜在变量数 (Latent variables, LVs) 来平衡欠拟合与过拟合问题^[25], 采用准确率对光谱判别模型进行评价, 建模对比不同预处理后光谱建模结果, 确定最优预处理及最优模型。

2.4 板栗产地与自然霉变判别模型

采集 417 颗板栗样本的光谱数据 (144 颗迁西板栗、129 颗丹东板栗、144 颗玉溪板栗), 按照 2:1 比例使用 Kennard - Stone (K - S) 算法随机划分训练集和预测集, 用于分类建模的训练集共有 278 颗 (96 颗迁西板栗、86 颗丹东板栗、96 颗玉溪板栗), 用于建模后外部验证的预测集包括 139 颗 (48 颗迁西板栗、43 颗丹东板栗、48 颗玉溪板栗)。为消除光谱数据掺杂的无关信息和噪声, 对原始光谱进行无预处理、SNV、SNV + 去趋势、标准化、一阶导数或二阶导数而后建立 PLS - DA 模型, 结果如表 1 所示。结果显示 SNV 预处理后的 PLS - DA 模型最优, 预测集判别准确率达 97.12%。

表 1 不同预处理方式下偏最小二乘判别的板栗产地判别结果

Tab.1 Classification results of chestnuts from various geographical origins by PLS - DA models based on different preprocessings

预处理方式	准确率/%			LVs
	训练集	交叉验证集	预测集	
无	97.84	94.96	95.68	16
标准化	97.48	95.32	94.96	15
SNV	99.28	98.20	97.12	18
SNV + 去趋势	97.84	96.04	94.96	14
一阶导数	98.56	95.32	94.96	16
二阶导数	100	84.89	84.17	19

自然霉变判别模型的建立基于随机挑选 266 个样本作为校正集 (124 颗健康和 142 颗霉变)、133 个样本作为预测集 (62 颗健康和 71 颗霉变), 最终构建的不同预处理光谱为输入的 PLS - DA 模型判别结果如表 2 所示。可以看出几种预处理方式下建模结果差异不大, 其中标准化后光谱的预测集分类效果最好, 准确率为 94.74%。

由此分析知, 利用可见/近红外光谱对板栗产地以及霉变判别是可行的, 判别模型鲁棒性和稳定性

表 2 不同预处理方式下偏最小二乘判别的霉变板栗判别结果

Tab.2 Classification results of moldy chestnuts by PLS - DA models based on different preprocessings

预处理方式	准确率/%			LVs
	训练集	交叉验证集	预测集	
无	98.87	98.12	93.23	10
标准化	99.62	99.62	94.74	15
SNV	98.12	97.74	93.98	10
SNV + 去趋势	99.25	98.87	93.98	12
一阶导数	97.74	97.37	91.73	7
二阶导数	94.74	93.23	90.98	4

较好, 后续选取各自最优预处理光谱建立的模型进行装置的试验验证。

3 检测分选系统试验验证

3.1 振动盘频率确定

为确定振动盘最佳振动频率, 测定了振动频率与板栗上料时间之间的关系。向料斗中心放置单颗板栗, 分别设置数字调压控制器振动频率为 120、130、140、150、160、170 Hz, 记录不同频率下单颗板栗到达 0 号口 (光电检测口) 的时间, 重复试验 5 次取均值, 结果如图 10 所示。从图 10 可以看出, 当振动频率为 150 ~ 170 Hz 时, 上料时间趋于稳定。振动频率为 150 Hz 时所需时间为 60 s 左右, 选择 150 Hz 以上的频率来驱动, 上料速率提升不明显且工作噪声增大, 因此将频率设置为 150 Hz。

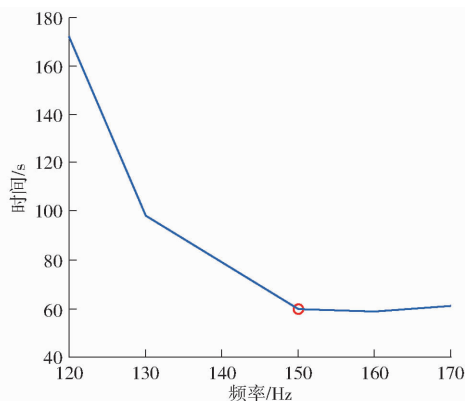


图 10 不同频率下单颗板栗上料时间曲线

Fig.10 Feeding time of single chestnut at different frequencies

3.2 检测分选试验验证

随机选取与建模无关的 68 颗霉变板栗与 68 颗健康板栗进行在线检测分选, 另选取与建模无关的 54 颗迁西板栗、54 颗丹东板栗和 54 颗玉溪板栗进行产地在线检测分选, 分别标识标签并记录落入对应收集箱的个数, 完成分选成功率测试试验。详细试验验证结果如表 3 所示, 迁西板栗有 2 颗误分, 丹

表3 详细验证数据混淆矩阵

Tab.3 Confusion matrix of detailed validation data

真实标签	预测标签				
	迁西	丹东	玉溪	健康	霉变
迁西	52	1	1		
丹东	2	49	3		
玉溪	1	2	51		
健康				63	5
霉变				3	65

东板栗有5颗误分,玉溪板栗有3颗误分,产地分类的整体准确率为93.83%;霉变板栗中有3颗误分,健康板栗有5颗误分,分类整体成功率为94.12%。动态试验验证中分选精度略低于静态建模,部分原因是动态光谱采集过程中落入孔洞板栗是随机姿态导致板栗的测点处于随机位置,进一步研究将在静态建模时采集多姿态测点取平均光谱建模,以减小动态检测分选中板栗随机位置对结果的影响。

系统检测分选时间包括上料时间、光谱采集和分选运行时间,单个板栗的全检测分选环节通过秒表记录时间。从板栗落入0号光电检测口开始计时,到板栗落入分选框停止计时,经过近百次测试统计单果从0号口到第1个分选框的平均时间约为12.3s,到第2个分选框的平均时间约为24.0s,到第3个分选框的平均时间约为35.0s。测试中记录得到最优的振动盘启停上料落果间隔约为0.6s,单颗板栗光谱动态采集时间约为0.4s,推杆执行分选时间约为0.5s,进一步经视频记录稳定连续工作中检测分选最优速度为37颗/min,但由于板栗形状不规则振动盘落果间隔时间通常在0.6~2.5s之间,导致总体检测分选效率存在一定随机性,因此当前系统的检测分选效率会略低于最优结果。以上验

证结果表明该检测分选系统可初步满足板栗产地和霉变实时检测分选精度、稳定性以及分选效率的需求。

4 结论

(1)基于可见/近红外光谱技术设计了转盘式板栗检测分选系统。该系统由上料单元、光谱采集单元、控制单元、分选单元、显示单元等硬件以及编写的单片机控制程序与光谱采集软件组成,可以实现对板栗产地以及是否霉变进行快速、无损、实时检测分选。

(2)为建立迁西板栗、丹东板栗、玉溪板栗产地判别以及自然霉变、健康板栗判别模型,基于K-S法合理划分训练集与预测集后,应用SNV、SNV+去趋势、标准化、一阶导数或二阶导数等算法对光谱进行预处理,建立PLS-DA判别模型进行对比。结果表明,产地判别SNV预处理后的PLS-DA模型最优,预测集判别准确率达97.12%,霉变判别标准化预处理后的PLS-DA模型最优,预测集判别准确率为94.74%。

(3)选取未参与建模板栗对产地以及是否霉变进行了无损检测与分选系统预测验证,结果表明振动盘最佳频率为150Hz,产地分选准确率为93.83%、霉变分选准确率为94.12%,最优检测分选速度为37颗/min。

(4)本文自主研发的转盘式板栗可见/近红外光谱在线检测系统可用于板栗品质的分选,建模精度良好、稳定性和分选效率满足需求,可实现板栗的无损检测和分选,对推动近红外光谱技术在板栗等木本粮油林果品质安全的实时无损检测和分选提供了思路和技术基础,具备一定的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 郑伟. 浅谈发展木本粮油对保障粮食安全的意义[J]. 森林防火, 2022, 40(2): 107-109.
ZHENG Wei. Discussion on the significance of developing woody grain and oil to ensure food security[J]. Journal of Wildland Fire Science, 2022, 40(2): 107-109. (in Chinese)
- [2] 韩元顺, 许林云, 周杰. 中国板栗产业与市场发展现状及趋势[J]. 中国果树, 2021(4): 83-88.
HAN Yuanshun, XU Linyun, ZHOU Jie. Status and trend of the development of chestnut industry in China[J]. China Fruits, 2021(4): 83-88. (in Chinese)
- [3] 邓诗意, 殷萍, 张强, 等. 基于稳定同位素和矿物元素的板栗产地判别分析[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 351-359.
DENG Shiyi, YIN Ping, ZHANG Qiang, et al. Discrimination of the geographical origin of Chinese chestnut based on stable isotope and rare earth element fingerprint characteristics[J]. Food Science, 2023, 44(12): 351-359. (in Chinese)
- [4] 杨雨图, 熊杰, 司万, 等. 基于可见/近红外光谱技术的板栗产地识别[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(12): 189-194, 203.
YANG Yutu, XIONG Jie, SI Wan, et al. Detection of chestnut production place based on visible and near-infrared spectroscopy[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(12): 189-194, 203. (in Chinese)
- [5] 孙晓荣, 田密, 刘翠玲, 等. 太赫兹衰减全反射技术对板栗果仁霉变程度判别研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(14): 4527-4533.
SUN Xiaorong, TIAN Mi, LIU Cuiling, et al. Identification of moldy degree of Chinese chestnut kernel by Terahertz attenuated total reflection technique[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2022, 13(14): 4527-4533. (in Chinese)
- [6] OVERY D P, SEIFERT K A, SAVARD M E, et al. Spoilage fungi and their mycotoxins in commercially marketed chestnuts[J]. International Journal of Food Microbiology, 2003, 88(1): 69-77.
- [7] BERTUZZI T, RASTELLI S, PIETRI A. Aspergillus and penicillium toxins in chestnuts and derived products produced in Italy

- [J]. *Food Control*, 2015, 50(1): 876–880.
- [8] RODRIGUES P, VENANCIO A, LIMA N. Mycobiota and mycotoxins of almonds and chestnuts with special reference to aflatoxins[J]. *Food Research International*, 2012, 48(1): 76–90.
- [9] MASSABTINI R, MOSCETTI R, FRANGIPANE M T. Evaluating progress of chestnut quality: a review of recent developments[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 113: 245–254.
- [10] 孙红, 梁媛媛, 田男, 等. 鲜切果品新鲜度可见/近红外快速检测装置设计与实验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(增刊): 393–398.
SUN Hong, LIANG Yuanyuan, TIAN Nan, et al. Design of freshness detection device for fresh-cut fruit using visible/near-infrared spectroscopy[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(Supp.): 393–398. (in Chinese)
- [11] TEIXEIRA A M, SOUSA C. A review on the application of vibrational spectroscopy to the chemistry of nuts[J]. *Food Chemistry*, 2019, 277: 713–724.
- [12] 王文秀, 彭彦昆, 孙宏伟, 等. 基于光谱技术的原料肉新鲜度指标在线检测系统开发及试验[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(4): 1169–1176.
WANG Wenxiu, PENG Yankun, SUN Hongwei, et al. Development and test of on-line detection system for meat freshness evaluation based on spectroscopy technology[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(4): 1169–1176. (in Chinese)
- [13] 王亚丽, 彭彦昆, 赵鑫龙, 等. 玉米种子活力逐粒无损检测与分级装置研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(2): 350–356.
WANG Yali, PENG Yankun, ZHAO Xinlong, et al. Design and experiment of non-destructive testing and grading device for corn seed vigor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(2): 350–356. (in Chinese)
- [14] 彭彦昆, 戴宝琼, 李阳, 等. 玉米主要品质便携式检测装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(9): 382–389.
PENG Yankun, DAI Baoqiong, LI Yang, et al. Design and experiment of portable device for testing main quality in corn[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(9): 382–389. (in Chinese)
- [15] 王凡, 李永玉, 彭彦昆, 等. 便携式马铃薯多品质参数局部透射光谱无损检测装置[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(7): 348–354.
WANG Fan, LI Yongyu, PENG Yankun, et al. Hand-held device for non-destructive detection of potato quality parameters[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(7): 348–354. (in Chinese)
- [16] 赵娟, 沈懋生, 浦育歌, 等. 基于近红外光谱与多品质指标的苹果出库评价模型研究[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(2): 386–395.
ZHAO Juan, SHEN Maosheng, PU Yuge, et al. Out-of-warehouse evaluation and prediction model of apple based on near-infrared spectroscopy combined with multiple quality indexes[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(2): 386–395. (in Chinese)
- [17] 乔鑫, 彭彦昆, 王亚丽, 等. 手机联用的苹果糖度便携式检测装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(增刊2): 491–498.
QIAO Xin, PENG Yankun, WANG Yali, et al. Design of portable device for testing sugar content of apples combined with mobile phones[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(Supp.2): 491–498. (in Chinese)
- [18] NARDECCHIA A, PRESUTTO R, BUCCI R, et al. Authentication of the geographical origin of “Vallerano” chestnut by near infrared spectroscopy coupled with chemometrics[J]. *Food Analytical Methods*, 2020, 13: 1782–1790.
- [19] MOSCETTI R, MONARCA D, CECCHINI M, et al. Detection of mold-damaged chestnuts by near-infrared spectroscopy[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 93: 83–90.
- [20] 展慧, 李小昱, 周竹, 等. 基于近红外光谱和机器视觉融合技术的板栗缺陷检测[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 345–349.
ZHAN Hui, LI Xiaoyu, ZHOU Zhu, et al. Detection of chestnut defect based on data fusion of near-infrared spectroscopy and machine vision[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(2): 345–349. (in Chinese)
- [21] 何珂, 罗秀芝, 孙钦明, 等. 基于气流与多点激光技术的牛肉新鲜度检测装置研发[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(21): 278–286.
HE Ke, LUO Xiuzhi, SUN Qinming, et al. Development of beef freshness detection device based on air flow and multi-point laser technique[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(21): 278–286. (in Chinese)
- [22] 姜洪喆, 吴俣, 李兴鹏, 等. 带壳板栗含水率的可见/近红外与中短波近红外光谱检测对比研究[J]. *包装与食品机械*, 2024, 42(2): 47–54, 61.
JIANG Hongzhe, WU Yu, LI Xingpeng, et al. Comparative study on detection of moisture content in chestnuts with shell using visible/near infrared, and mid-and short-wave near infrared spectroscopy[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2024, 42(2): 47–54, 61. (in Chinese)
- [23] 樊书祥, 王庆艳, 杨雨森, 等. 水果糖度可见-近红外光谱手持式检测装置开发与试验[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(10): 3058–3063.
FAN Shuxiang, WANG Qingyan, YANG Yusen, et al. Development and experiment of a handheld visible/near infrared device for nondestructive determination of fruit sugar content[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(10): 3058–3063. (in Chinese)
- [24] 王凡, 赵春江, 徐波, 等. 便携式茶鲜叶品质光谱检测装置研制[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(24): 273–280.
WANG Fan, ZHAO Chunjiang, XU Bo, et al. Development of a portable detection device for the quality of fresh tea leaves using spectral technology[J]. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(24): 273–280. (in Chinese)
- [25] BARKER M, RAYENS W. Partial least squares for discrimination[J]. *Journal of Chemometrics*, 2003, 17(3): 166–173.