

# 基于高光谱图像的小麦种子纯度/含水量检测系统

朱潘雨<sup>1</sup>, 方雯昕<sup>1</sup>, 黄敏<sup>1</sup>, 赵鑫<sup>1</sup>, 陈艳萍<sup>2</sup>

(1. 江南大学 轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122;

2. 江苏省农业科学院粮食作物研究所, 南京 210014)

**摘要:** 为了满足小麦种子纯度和含水量检测的现场应用需求, 实现集图像采集, 数据分析, 模型更新, 结果输出于一体的自动化系统检测, 借助高光谱图像技术, 开发了小麦种子纯度/含水量自动检测系统; 所开发系统硬件层面以 STM32 芯片为控制核心, 配合 SHT20 温湿度检测模块、光源控制模块和步进电机驱动模块, 实现操作环境信息获取、平台运动控制、光源功率和高光谱相机焦距调整; 利用上位机实现高光谱图像的实时采集和 STM32 控制模块的信息交互; 利用 Python 语言编写软件操作平台的后台逻辑和人机交互界面; 系统采用偏最小二乘回归模型实现对小麦种子含水量的检测 (决定系数为 0.943、均方根误差为 0.81%)、采用偏最小二乘鉴别模型实现对小麦种子纯度的检测 (准确率为 96.5%, 精确率为 93.0%, 召回率为 93.0%); 所设计的小麦种子纯度/含水量检测系统具有功能完善、操作简便、可扩展性强等优点, 为促进高光谱图像技术在小麦种子质量检测领域的现场应用提供了可能。

**关键词:** 小麦种子品质; 高光谱图像技术; 检测系统; 纯度; 含水量

## Wheat Seed Purity or Moisture Content Detection System Based on Hyperspectral Images

ZHU Panyu<sup>1</sup>, FANG Wenxin<sup>1</sup>, HUANG Min<sup>1</sup>, ZHAO Xin<sup>1</sup>, CHEN Yanping<sup>2</sup>

(1. Jiangnan University, Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry, Ministry of Education, Wuxi 214122, China; 2. Institute of Food Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** In order to meet the field application needs of wheat seed purity and water content detection, and realize the integrations of image collection, data analysis, model updating, and result output in automatic system detection, an automatic detection system for wheat seed purity or water content is developed with the help of hyperspectral image technology; The hardware level of the developed system takes STM32 chip as the control core, and cooperates with SHT20 temperature and humidity detection module, light source control module and stepping motor drive module to achieve the information acquisition of operating environment, platform motion control, light source power and hyperspectral camera focus adjustment; The upper computer is used to realize the real-time acquisition of hyperspectral images and the information exchange of STM32 control module; The background logic and human-computer interaction interface of the software operation platform are written by Python; the partial least squares regression model is used to detect the moisture content of wheat seeds (the determination coefficient is 0.943, the root mean square error is 0.81%), and the partial least squares discriminant analysis model is used to detect the purity of wheat seeds (the accuracy rate is 96.5%, the accuracy rate is 93.0%, and the recall rate is 93.0%); The designed wheat seed purity or water content detection system has the advantages of perfect function, simple operation and strong scalability, which makes it possible to promote the field application of hyperspectral image technology in wheat seed quality detection.

**Keywords:** wheat seed quality; hyperspectral image technology; inspection system; purity; moisture content

## 0 引言

种子是一切农业生产的基础。小麦种子的纯度和含水量是反映小麦种子质量的两个重要指标。随着杂交技术的广泛使用, 各种新品种的小麦种子不断涌现, 为改善作物产量和品质, 提高农业经济效益提供了条件。但是育种过程中的去雄不彻底, 育种区域内其它品种污染, 都会导

致小麦种子纯度的降低, 并最终影响到作物的产量和品质<sup>[1]</sup>。小麦种子的含水量对小麦种子的寿命有着重要的影响。当小麦种子含水量过高时, 会使小麦种子呼吸作用过于旺盛, 并使微生物大量繁殖, 从而使贮藏小麦种子的寿命大大缩短; 而当小麦种子含水量过低时, 则会使小麦种子失水死亡<sup>[2]</sup>。因此, 小麦种子的纯度、水分是我国《农作物种子检验规程》规定的小麦种子检验的必检项目。

收稿日期: 2022-09-13; 修回日期: 2022-10-08。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61271384)。

作者简介: 朱潘雨(1994-), 男, 安徽安庆人, 硕士生, 主要从事光学检测技术方向的研究。

黄敏(1974-), 女, 辽宁铁岭人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事控制理论与控制工程, 检测技术与自动化装置方向的研究。

引用格式: 朱潘雨, 方雯昕, 黄敏, 等. 基于高光谱图像的小麦种子纯度/含水量检测系统[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(4): 76-82.

传统的小麦种子纯度检测主要包括形态鉴定、田间种植、生化方法和分子标记技术; 而含水量检测主要采用烘干减重法、甲苯蒸馏法和卡尔费休法等。上述方法存在实时性差、难以满足小麦种子企业在收储环节对小麦种子逐批次检测的需要。近年来, 具有快速、无损检测优点的高光谱图像技术被引入到小麦种子的纯度和含水量检测领域, 涌现了大量的研究报道<sup>[3-8]</sup>。然而, 现有的研究都是基于实验室条件, 当面向收储环节的现场应用时, 需要解决下列问题: 1) 利用高光谱图像进行小麦种子纯度和水分检测时, 涉及到系统校准、图像采集和后续的数据分析处理等多个环节; 但现有的设备集成度差, 需要操作人员具备较高的技能, 导致现场应用困难; 2) 小麦种子品种的多样性、种植环境的时空分布变化会导致数据分析模块的性能退化, 需要及时更新维护数据分析模块。

为了满足小麦种子纯度和含水量检测的现场应用需求, 本文基于高光谱图像技术, 开发了小麦种子纯度/含水量自动检测系统。检测系统集成系统校准、高光谱图像采集、数据分析, 模型更新、报告输出等功能模块, 具有功能完善、操作简便、可扩展性强等优点。所设计的小麦种子纯度(准确率 > 90%, 精确率 > 90%, 召回率 > 90%) 和含水量(决定系数 > 0.9, 均方根误差 < 1.0%) 检测系统为促进高光谱图像技术在小麦种子质量检测领域的现场应用提供了可能。

## 1 高光谱成像技术

高光谱成像技术通过高光谱相机获取被测物体在不同波段下的空间图像(称为高光谱图像), 并借助于化学计量学方法构建高光谱图像与被测物体感兴趣指标(成分、种类等)的函数关系, 从而实现感兴趣指标的无损快速测量<sup>[9-12]</sup>。图 1 给出了由高光谱相机获取的高光谱图像数据结构。其中,  $x$  和  $y$  代表空间信息,  $z$  代表光谱(波段)信息。为了获得完整、清晰的被测物体的空间信息, 高光谱成像系统需要涉及到光源功率、高光谱相机焦距、平台运动、图像采集等多个环节的协调控制; 同时为了获得高精度的检测模型, 需要开发和维护后续的数据分析模块。本文对上述关键环节进行集成优化, 以实现小麦种子纯度/含水量的高精度检测。

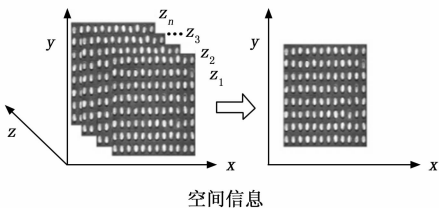


图 1 高光谱数据结构

## 2 系统硬件设计

### 2.1 硬件整体设计

如图 2 所示, 基于高光谱图像的小麦种子纯度/含水量

检测系统的硬件模块主要由 STM32 控制模块、温湿度传感器、步进电机(含驱动板)、载物台、数粒板、光源(含控制器), 高光谱相机、Windows 操作平台和操作暗箱 9 部分组成。STM32 控制模块以 STM32F103RBT6 芯片为控制核心, 控制步进电机 1 和 2 的移动速度和方向, 实现成像系统的焦距调整和多粒小麦种子图像的不失真采集。为了保证采集环境温湿度的稳定和高光谱图像的信噪比, STM32 控制模块通过 RS232 协议控制光源 5 的功率, 并通过 RS485 协议读取温湿度传感器 6 采集温湿度信息。除软件操作平台外, 整个硬件系统放置在操作暗箱内, 以避免环境光的干扰。在采集小麦种子高光谱图像数据时, 将载有小麦种子的数粒板放置在载物台上, 通过上位机软件完成对电机运动的控制, 光源功率的调节和图像的采集。

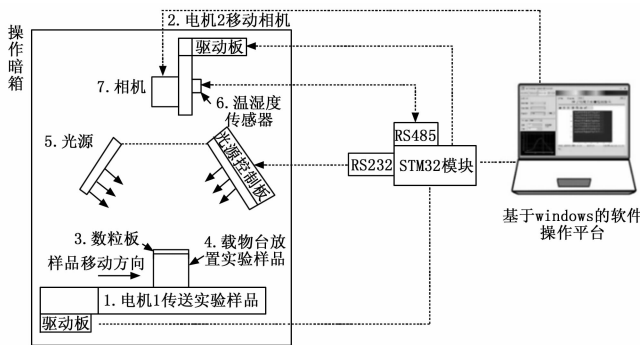


图 2 系统总体结构图

### 2.2 电机模块

基于高光谱图像的小麦种子纯度/含水量检测系统所使用的步进电机 1 和 2 的驱动器工作电压为 24 V, 输入脉冲下降沿有效, 控制电机的移动速度以及移动方向, 脉冲低电平为 0~+0.5 V, 高电平为 +5~+28 V。以电机 1 控制为例, 由于 STM32 的 IO 输入输出高低电平分别为 +3.3 V 和 0 V, 欲使其低电平满足 0~+0.5 V, 高电平满足 +5~+28 V, 应将 STM32 的 IO 口接 1 kΩ 的上拉电阻和 +5 V 电平实现漏极开路输出, 如图 3 所示。图 3 中 PC12 为 STM32 引脚获取输入脉冲, HPWM 接驱动器控制电机移动速度, 电机移动方向控制原理也类似。

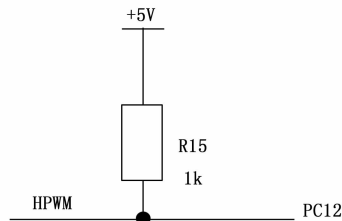


图 3 漏极开路输出电路原理图

为了防止载物台移动到两端时, 电机保持继续转动对电机本身造成损害, 本系统采用了工作电压为 24 V 的 NPN 型接近开关来检测载物台是否移动到电机两端, 该接近开关的电源线接 +24 V 和地, 信号线向 STM32 发送高低电平。其工作原理为当接近开关前端检测到金属物体时, 接

近开关触发,灯亮且信号线释放低电平。由于信号线在高电平时为+24 V,需要将其接 22 K 电阻分压,才能保证 STM32 接收到的高电平为+3.3 V,当 STM32 接收到金属感应接近开关的低电平信号时,立即向电机发送停止信号。

### 2.3 温湿度检测模块电路

CCD 成像器件在无光注入情况下产生暗电流信号,暗电流受温度的强烈影响<sup>[13-15]</sup>。为了减小温度变化对暗电流产生影响,导致前后采集到图像的暗电流不一致,本系统采用高精度的 SHT20 温湿度传感器用来监测操作箱内温湿度变化,在操作暗箱内温湿度不再发生变化的前提下进行图像采集。该温湿度传感器电源线分别接+12 V 和 GND,由于开关电源输出电压为 24 V,为了减少外部元器件的使用,并且使得系统的集成化程度更高,本系统采用 TPS5430DDAR 芯片将 24 V 电源转为 12 V 电源电路模块集成到开发板上,电路原理如图 4 所示。图 5 为 TTL 转 RS485 电路原理图,主芯片为 SP3485EEN, U6 接温湿度传感器信号线,用于与 SP3485EEN 传输信号, PA2, PA3 接 STM32 芯片对应引脚,用来建立 SP3485EEN 与 STM32 通信,STM32 接 PA4 控制接收器和驱动器使能。

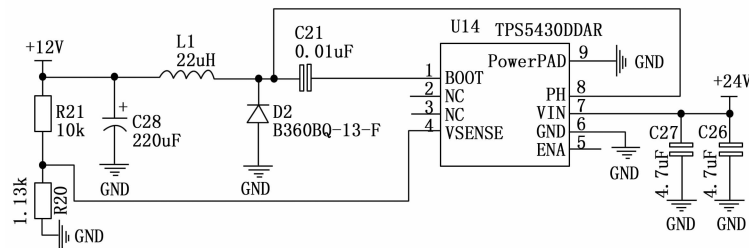


图 4 24 V 转 12 V 模块电路原理图

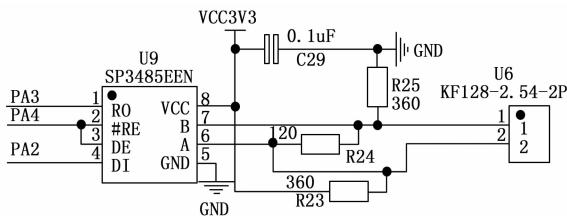


图 5 TTL 转 RS485 模块电路原理图

### 2.4 成像模块和光源功率调节

成像模块和光源功率调节模块为图像采集模块的硬件部分。成像模块采用由美国 Corning 公司生产的 microHSI-410 高光谱相机以线扫描的方式进行数据采集,其波段范围为 400~1 000 nm,空间分辨率最大为 1 000×1 265 个像素点,其中 1 000 为线扫描下完整批次的总条数,1 265 为每条线扫描下获取的像素点,光谱分辨率在 2~8 nm 编程可调。在接收上位机的指令后,电机 1 运动,相机打开并根据相应参数调整曝光时间对实验样品进行拍摄,将每次线扫描采集到的高光谱数据传输至上位机整合成一副完整的高光谱图像。

本系统采用 Illumination Technologies 公司生产的卤素光源,光源功率 0~150 W 内连续可调,具有稳定的光照强

度输出,误差控制为±0.1%以内。该光源配套的光源控制器具有手动调节,基于 RS232 协议的编程指令调节和基于 RS485 协议的编程指令调节 3 种方式。其中后两种方式通过 DB15 的双排接口接收 STM32 传送过来的指令。本系统基于 RS232 协议,实现光源功率调节,主要由 STM32 控制 RS232 模块,进而控制满足需求的光照强度。相应的硬件实现电路原理如图 6 所示,图中 IN1, OUT1 分别接 DB15 的引脚 6 和引脚 7,以建立 RS232 与单片机通信。光源具有近似稳定的线性输入输出,在实际开发中需要将其转为对应的二进制编码(例如“255”在程序中应为“11111111”)传到 TTL 转 RS232 模块即可实现对光源强度的控制,本系统与手动调节类似,采用 10 个档位进行调节,在上位机发出光源强度指令信号以后,STM32 获取到该指令,并通过 RS232 对光源强度进行调节。

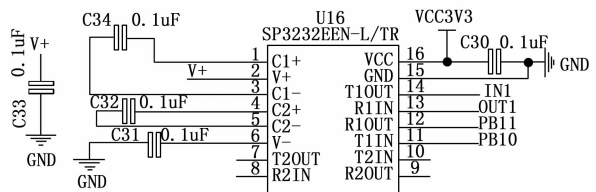


图 6 TTL 转 RS232 模块电路原理图

## 3 软件设计

### 3.1 整体设计

基于高光谱图像的小麦种子纯度/含水量检测系统的软件部分基于 Python 编程语言实现,由数据管理模块,系统校正模块,图像采集模块,数据分析模块和模型更新模块组成,软件操作平台框架如图 7 所示。软件操作平台设计流程如下:1) 系统运行以后首先会出现登录界面,获得普通权限可以完成系统校正,图像采集,数据分析操作等功能;在登录界面获取管理员权限才能进入模型更新模块;2) 在系统校正模块中,实验人员随机设置初始化曝光时间,光源强度和样品移动速度,在系统校正模块中预拍摄一张图像,获取到最佳的光源强度和样品移动速度参数;3) 系统校正模块中获取到的参数自动导入图像采集模块中,实验人员即可进行图像采集;4) 在数据分析模块中对采集的图像进行分析,包括含水量和纯度检测两项指标;5) 根据实际需要在模型更新模块中可对模型进行训练和更新,数据管理等操作,其流程如图 8 所示。

### 3.2 系统校正模块

美国 Corning 公司为本系统使用的 microHSI-410 高光谱相机提供了一套与 python 编程语言相适应的 API 接口,使对相机的初始化设置,拍摄数目,曝光时间等多种操作可以通过编程实现。根据需求,系统校正模块应当实现聚焦调节,光源校正和速度校正 3 种校正以匹配图像采集所需最佳参数,界面如图 9 所示。初始化基本参数设置包括光源强度,曝光时间和速度。本模块实现的功能为移动电机 2 实现焦距的调节,预拍摄一副白板校正图像实现光源

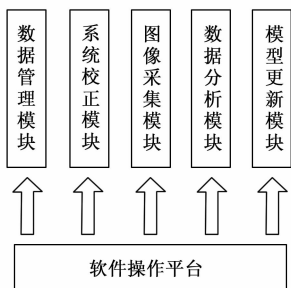


图 7 软件操作平台设计

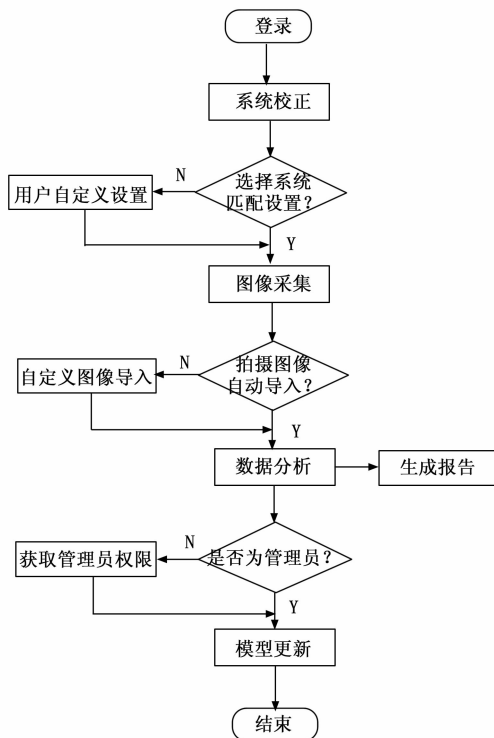


图 8 软件操作平台设计流程

校正, 预拍摄一副正圆物体的图像实现速度校正。具体软件实现如下: 1) 将获取的“光源强度”值编码为“utf-8”写入串口并传输至下位机, 下位机与 RS232 通信对光源亮度调节 (通信方式见 2.3); 2) 通过定时器给电机 2 分配移动速度, 使 STM32 接收到上位机的指令后, 即可实现对电机 2 移动方向和移动速度的控制; 3) “光源校正”板块操作开始后, 系统自动打开相机并通过相机 API 接口提供的 set\_exposure 函数对曝光时间进行设置, 同时将给出的初始速度进行编码写入串口传输至下位机, 电机开始移动。结束拍摄时, 相机关闭且调用时间线程停止电机移动, 拍摄完成。此时系统自动提取拍摄到的光谱数据并将其最大值的 2/3 作为最终的光源强度。利用界面弹出对话框确定用户是否保存系统分析的光源强度数值, 如需保存则将此数值写入 txt 文档中; 4) “速度校正”板块拍摄原理与“光源校正”板块类似, 不同之处在于本板块需要拍摄的是正圆形的物体, 系统后台会自动提取此高光谱图像下的图像信

息, 根据轮廓检测算法提取到正圆形物体所处的感兴趣区域<sup>[16-19]</sup>, 计算其长短轴之比来匹配合适的物体移动速度, 使其满足图像采集过程中不失真的要求, 同时界面会弹出对话框, 确定用户是否保存系统分析的速度数值, 如需保存则将此数值写入 txt 文档中。



图 9 系统校正设计

### 3.3 图像采集模块

在进入本系统图像采集模块的同时, 系统会自动导入用户在系统校正模块中保存的光源强度, 曝光时间和速度, 实验人员也可以根据实际需要自行设置, 完成上述设置即可进行图像采集操作。本系统进行小麦种子含水量测定和品种纯度鉴定除需要采集正常的样品图像外, 还包含采集高光谱反射实验所需的黑板校正图像和白板校正图像以消除暗电流影响<sup>[20-23]</sup>, 校正公式:

$$I = \frac{I_0 - D}{R - D} \quad (1)$$

$R, D, I_0, I$  分别为全白板图像、全黑板图像、采样图像和校正后的图像。由于采集 1 000 条样品即可完成一个批次数据的拍摄, 所以设计样品采集图像在每个波段下的空间分辨率为  $1\ 000 \times 1\ 265$  个像素点。相应地, 对于黑白板校正图像的设计均为采集 10 条样本数据, 即共  $10 \times 1\ 265$  个像素点, 对其求平均再将其维度扩展为  $1\ 000 \times 1\ 265$ , 利用以上处理数据对图像进行校正。图 10 显示了拍摄全黑板图像, 全白板图像以及样品图像相应的界面。为了提高效率, 减少内存占用, 本模块采用边采集图像边保存的方式。即在采集图像的同时, 借助 gdal 包将拍摄到的数据逐条写入 hdr 文件中, 并默认保存到当前目录的“HDRData”目录下。用户也可以根据采集图像前弹出的对话框自定义文件保存路径。为了将拍摄到的图像直观地展示出来, 系统选取波长分别为 635 nm, 525 nm, 460 nm 下对应图像组合成的伪 RGB 图像<sup>[24-26]</sup>, 通过 matplotlib 和 pyqt5 展示, 如图 10 所示。同时为了方便实验人员对图像波形有基本的了解以及便于后续的操作, 系统将光谱数据通过界面展示出来, 即用户可以点击图像内的任意位置, 显示其波形图, 图 10 左下角所示。

### 3.4 数据分析模块

偏最小二乘算法 (PLS, partial least squares) 的基本思想是最小化误差的平方和找到一组数据的最佳函数匹配。首先对高光谱数据矩阵  $X$  和含水量矩阵  $Y$  进行主成分分析:

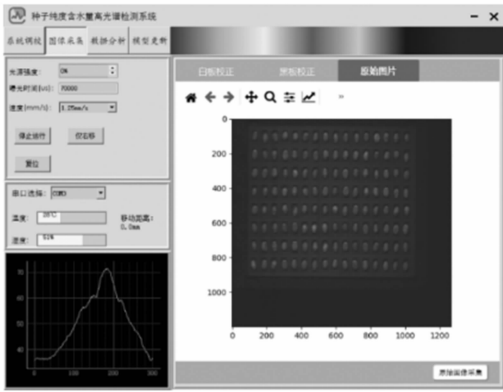


图 10 样品采集模块

$$\begin{aligned} X &= TP + E \\ Y &= UQ + F \end{aligned} \quad (2)$$

主成分个数由权重项  $\omega$  决定，分解得到各自对应的得分矩阵  $T$ 、 $U$  和载荷矩阵  $P$ 、 $Q$ ，残差项分别为  $E$ 、 $F$ 。通过主成分分析  $T=XP$ ，可以将高光谱数据矩阵和含水量矩阵分别降至相应的低纬度空间，并保留原矩阵中的大部分有效信息。再对建立各自得分矩阵之间的线性回归方程：

$$U = TB \quad (3)$$

$B$  为回归系数矩阵：

$$B = TU(T^T T)^{-1} \quad (4)$$

最后  $X$  相对与  $Y$  的线性回归可转变为  $X$  得分矩阵相对于  $Y$  的线性回归<sup>[27]</sup>：

$$Y = TBQ \quad (5)$$

PLS-DA 是最常用的一种线性判别算法。PLS-DA 的基本思想是通过 PLS 分类技术在特征提取过程中获取样本的分类信息，然后建立自变量和分类变量之间的回归模型，进而有效地提取出与分类有关的特征变量，实现数据的分类识别。主要步骤如下：首先对光谱矩阵  $X$  和类别向量  $Y$  进行正交分解，得到光谱矩阵和类别向量  $Y$  的得分矩阵  $T$  和  $U$ ，见式 (7) 和式 (8)。然后对得分矩阵  $T$  和  $U$  进行线性回归，求得回归系数  $B$ ，如式 (9) 和式 (10) 所示。最后通过式 (11) 求得未知样品光谱矩阵  $X_{test}$  的预测类别  $Y_{test}$ 。其中  $P$  和  $Q$  分别为光谱矩阵  $X$  和类别向量  $Y$  的载荷矩阵； $E$  和  $F$  分别为光谱矩阵  $X$  和类别向量  $Y$  的 PLS 拟合残差矩阵<sup>[28]</sup>。

$$X = TP + E \quad (7)$$

$$Y = UQ + F \quad (8)$$

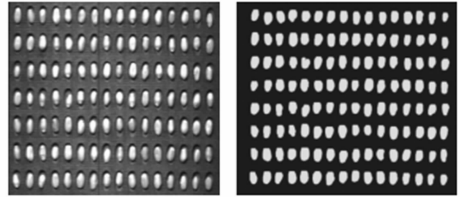
$$U = TB \quad (9)$$

$$B = (T^T T)^{-1} (T^T U) \quad (10)$$

$$Y_{test} = X_{test} BQ \quad (11)$$

本研究数据处理流程如下：1) 设定好光源强度，移动速度，对实验样品进行高光谱图像采集；2) 将采集到的高光谱图像进行黑白板校正和阈值分割，其中黑白板校正公式为公式 (1)，由于高光谱图像在第 180 波段 (757 nm) 处最为清晰，所以选择在此波段下进行阈值分割，获取感

兴趣区域，所拍摄的高光谱的伪 RGB 图像与阈值分割后的图像如图 11 (a)，11 (b) 所示；3) 提取阈值分割后感兴趣区域 (即小麦种子所在区域) 对应的高光谱数据，在小麦种子纯度检测中，以每粒小麦种子在 300 个波段下的平均光谱作为输入量，小麦的品种作为输出量，利用 PLS-DA 建模；在小麦种子含水量检测中，以每批小麦种子在 300 个波段下的平均光谱作为输入量，小麦的品种作为输出量，利用 PLS 建模。



(a) 拍摄原始高光谱图像 (b) 阈值分割后图像

图 11 所拍摄高光谱图像和阈值分割后图像

上述对小麦种子含水量的 PLS 算法模型和纯度检测的 PLS-DA 算法模型已经嵌入到本系统的数据分析模块当中，数据分析模块界面如图 12 所示。用户可根据图像采集模块中背景和实验样品的波形，选择合适的数值对阈值进行设置，即图 12 中阈值设置 1。对拍摄的图像进行预处理调用了 opencv 的结构体元素，该结构体的核函数大小由用户通过下拉框对阈值 2 进行设置，目的是按照需求对感兴趣区域进行腐蚀膨胀，获取到相对标准样品的形状。图中“模型选择”中通过系统后台遍历本地路径下已经训练好的品种纯度检测的模型。本模块连接打印功能，将模块分析的结果生成检测报告，检测报告主要包括品种纯度鉴定图像，含水量，检验日期和从数据库获取到当前的检验人员用户名等。

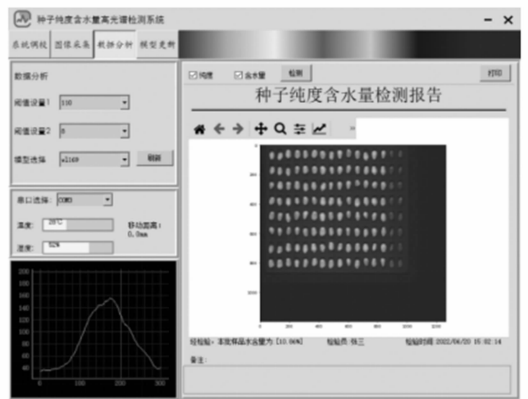


图 12 数据分析模块

### 3.5 模型更新模块

光谱信息易受环境、时间的影响，当待测样本的产地或者年份发生改变时光谱信息也随之改变，导致建立的模型的稳定性变差、泛化能力减弱<sup>[29]</sup>。为了提高系统的泛化能力以及确保小麦种子含水量和纯度的检测精度。本系统模型更新模块采用重新训练进行模型更新。具体实现为：1) 在人机交

互界面提供相应接口,将实验人员选择的信息(模型,数据,文件等)记录在相应的txt文档里面;2)模型更新或生成期间根据txt内容进行读取并运行,生成相应的模型;3)由用户选择是否对生成的新模型进行保存。具体操作为用户在如图13所示的界面中选择需要更新的模型,导入需要更新的数据,选择需要运行的程序系统后端会自动运行程序并自动生成对应模型。

### 3.6 数据管理模块

在进入系统界面之前,普通实验人员通过获得相应权限之后可以对前述3个模块进行操作(系统调节,图像采集和数据分析模块)。为了防止普通实验人员的误操作,在进入模型更新模块之前需要点击“管理员”获得更高级别的权限才能进入。同时为了方便数据的管理以及提高数据的安全性,本模块添加了mysql数据库功能。将mysql数据库应用到本系统当中,可以实现对对实验人员和管理人员的管理,以及对模型、实验数据和检测报告等重要资源的添加、删除、上传、下载等操作。数据管理模块如图13所示。



图13 模型更新和数据管理模块

## 4 实验与结论

### 4.1 含水量检测

本实验共使用50批小麦,每批20粒,共1000粒小麦种子。将小麦种子根据含水量不同划分为5个梯度等级,每个梯度10个批次。第一个梯度每批20粒小麦含水量为0 mg(0 mg/20粒),第二个梯度为720 mg/20粒,第三个梯度为1440 mg/20粒,第四个梯度为2160 mg/20粒,第五个梯度为2880 mg/20粒。实验采用烘干减重法,烘干前将每个批次小麦拍摄高光谱图像并称重,记录下此时重量 $M_2$ ,然后将其放入130℃恒温烘干箱中烘干1小时,烘干后称重并记录下此时重量 $M_1$ 。含水量测定公式如下:

$$R = \frac{M_2 - M_1}{M_2} \times 100\% \quad (12)$$

式中, $M_2$ 为烘干前的质量, $M_1$ 为烘干后的质量, $R$ 为含

水量。

本实验目前涉及到的含水量检测模型是围绕偏最小二乘回归算法展开的。实验将每批20粒小麦种子样品在对应的高光谱图像经过黑白板校正与阈值分割后,以300个波段下的平均光谱作为输入量,含水量作为输出量。采用PLS训练上述40批小麦种子样本干燥前的平均光谱和含水量,对上述剩余10批小麦种子样品进行预测,选择决定系数( $R^2$ ),均方根误差(RMSE)作为评价指标。PLS相关指标分别为决定系数0.943,均方根误差0.81%,满足系统含水量实际检测需求,10批小麦种子的真实值和预测值如表1所示。

表1 11批小麦种子含水量的真实值和预测值

批次 Batch	真实值 Actual value/%	预测值 Predicted value/%	批次 Batch	真实值 Actual value/%	预测值 Predicted value/%
1	18.83	18.81	7	16.73	17.57
2	13.57	13.89	8	17.59	18.76
3	8.31	8.65	9	10.90	10.40
4	16.91	17.48	10	15.76	15.85
5	14.72	14.47	11	18.55	17.74

### 4.2 纯度检测

本实验选取伟隆169,百农4199,济麦44,周麦33四个品种的小麦种子样品各1280粒。实验目的是进行纯度鉴别,即在混有上述4类小麦种子样品中,鉴别出满足需求的种子类别的小麦种子样品(以下称为正样本),将其余3个种类的小麦种子样品视为杂质样本(以下称为负样本)。

本实验对小麦种子的纯度鉴别是基于PLS-DA模型的基础之上实现的。实验对每个品种各拍摄了10批样本,每批小麦种子数量为128粒,对每批小麦种子样品对应的高光谱图像经过黑白板校正与阈值分割后,以每粒小麦种子在300个波段下的平均光谱作为输入量,小麦的品种作为输出量。实验选取了8批伟隆169共1024粒作为正样本,百农4199,济麦44,周麦33各80粒作为负样本,训练偏最小二乘判别分析模型,对剩余2批共1024粒小麦种子的正负混合样本进行预测。

类似地,在上述实验样本的基础上,以1024粒济麦44作为正样本,伟隆169,百农4199,周麦33各80粒作为负样本用偏最小二乘回归算法模型对剩余2批共1024粒小麦种子的正负混合样本进行预测进行预测,选取准确率,精确率和召回率作为评价指标。结果如表2所示,其中正样本为伟隆169和济麦44的准确率分别为96.5%和98.8%,精确率分别为93.0%和96.1%,召回率分别为93.0%和99.5%,满足系统小麦纯度检测的需求。

表2 鉴别不同品种正样本预测结果

正样本	准确率/%	精确率/%	召回率/%
伟隆169	96.5	93.0	93.0
济麦44	98.8	96.1	99.5

## 5 结束语

基于高光谱图像的小麦种子纯度/含水量检测系统弥补了人工检测方式效率低下, 当前高光谱设备采集的集成度低, 实时性差等不足, 在硬件方面以 STM32F103RBT6 为核心实现对电机, 光源强度, 温湿度信息读取等控制, 软件方面以 Python 编程语言为基础集数据管理、系统校正、图像采集、数据分析、模型更新于一体实现对小麦种子纯度/含水量检测。以偏最小二乘算法和偏最小二乘判别算法对该系统进行验证并取得了良好的效果, 证明了该系统可行性。

目前本系统对于模型的更新, 需要一定数量的数据进行训练, 这也是当前系统存在的不足, 未来应当实现用少量样本集成相关算法实现对模型的更新。

### 参考文献:

- [1] BAO Y, MI C, WU N, et al. Rapid classification of wheat grain varieties using hyperspectral imaging and chemometrics [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9 (19): 4119.
- [2] 胡小荣, 卢新雄, 张云兰, 等. AFLP 技术运用于小麦种子超干燥保存遗传完整性的初探 [J]. *植物遗传资源学报*, 2003 (2): 162-165.
- [3] 朱启兵, 冯朝丽, 黄敏, 等. 基于图像熵信息的玉米种子纯度高光谱图像识别 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28 (23): 271-276.
- [4] 曹维时, 张春庆, 王金星, 等. 离散小波变换和 BP 神经网络识别玉米种子纯度 (英文) [J]. *农业工程学报*, 2012 (S2): 253-258.
- [5] 闫小梅, 刘双喜, 张春庆, 等. 基于颜色特征的玉米种子纯度识别 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26 (s1): 46-50.
- [6] LAI Y, LIU G Q, LI Z, et al. Research on the method of seed water content measurement based on electromagnetic induction [J]. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2018, 74: 191-200.
- [7] 刘秀英, 余俊茹, 王世华, 等. 光谱特征变量和 BP 神经网络构建油用牡丹种子含水率估算模型 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36 (22): 308-315.
- [8] 袁揆, 陈乐生, 赵春宇, 等. 种子含水率在线测量系统 [J]. *农业机械学报*, 2006, 37 (9): 119-122.
- [9] HUANG H, LIU L, NGADI M O. Recent developments in hyperspectral imaging for assessment of food quality and safety [J]. *Sensors*, 2014, 14 (4): 7248-7276.
- [10] 李江波, 饶秀勤, 应义斌. 农产品外部品质无损检测中高光谱成像技术的应用研究进展 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31 (8): 2021-2026.
- [11] 孙俊, 张林, 周鑫, 等. 采用高光谱图像深度特征检测水稻种子活力等级 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37 (14): 171-178.
- [12] 李红, 张凯, 陈超, 等. 基于高光谱成像技术的生菜冠层含水率检测 [J]. *农业机械学报*, 2021, 52 (2): 211-217, 274.

- [13] XIA C, YANG S, HUANG M, et al. Maize seed classification using hyperspectral image coupled with multi-linear discriminant analysis [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 103: 103077.
- [14] 康丽, 袁建清, 高睿, 等. 高光谱成像的水稻稻瘟病早期分级检测 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41 (3): 898-902.
- [15] 常金强, 张若宇, 庞宇杰, 等. 高光谱成像的机采籽棉杂质分类检测 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41 (11): 3552-3558.
- [16] 陈树楠, 范影乐, 房涛, 等. 基于主视通路结构分级响应模型的轮廓检测方法 [J]. *自动化学报*, 2022, 48 (3): 820-833.
- [17] 蔡骋, 宋肖肖, 何进荣. 基于计算机视觉的牛脸轮廓提取算法及实现 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33 (11): 171-177.
- [18] 毕威, 黄伟国, 张永萍, 等. 基于图像显著轮廓的目标检测 [J]. *电子学报*, 2017, 45 (8): 1902-1910.
- [19] 蔡超, 王梦. 基于视觉感知机制的轮廓检测方法 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2011, 39 (7): 22-25.
- [20] FEMENIAS A, GATIUS F, RAMOS A J, et al. Standardisation of near infrared hyperspectral imaging for quantification and classification of DON contaminated wheat samples [J]. *Food Control*, 2020, 111: 107074.
- [21] 张航, 乔曦, 李振波, 等. 皮棉中地膜的高光谱图像分割方法 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32 (13): 161-167.
- [22] POLDER G, BLOK P M, DE VILLIERS H A C, et al. Potato virus Y detection in seed potatoes using deep learning on hyperspectral images [J]. *Frontiers in plant science*, 2019, 10: 209.
- [23] LIU C, HUANG W, YANG G, et al. Determination of starch content in single kernel using near-infrared hyperspectral images from two sides of corn seeds [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 110: 103462.
- [24] 支俊俊, 董娅, 鲁李灿, 等. 基于无人机 RGB 影像的玉米种植信息高精度提取方法 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37 (18): 48-54.
- [25] 巩畅畅, 刘鑫, 范斌, 等. 基于 RGB 三波段的消色差衍射透镜设计与分析 [J]. *光学学报*, 2021, 41 (11): 54-60.
- [26] DADABAYEV R, SHABAIROU N, ZALEVSKY Z, et al. A visible light RGB wavelength demultiplexer based on silicon-nitride multicore PCF [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 111: 411-416.
- [27] 皮世威, 林朝, 黄哲学. 基于 KOPLS 的多组物质光谱分析方法 [J]. *计算机测量与控制*, 2022, 30 (1): 229-233, 265.
- [28] 黄富荣, 宋晗, 郭臻, 等. 近红外光谱结合化学计量学的常见中国蜂蜜掺杂糖浆鉴别 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39 (11): 3560-3565.
- [29] 唐金亚, 黄敏, 朱启兵. 基于主动学习的玉米种子纯度检测模型更新 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35 (8): 2136-2140.