

草莓叶片叶绿素检测仪的设计与实验

杨彪^{1,2*} 赵怡桐¹ 任唯希¹

1. 商洛学院电子信息与电气工程学院; 2. 钒电池材料陕西省高等学校重点实验室

摘要: 针对草莓叶片叶绿素含量传统检测方法存在破坏性取样、操作烦琐或设备昂贵等不足, 设计了一种基于多光谱技术的手持式叶绿素含量检测仪。仪器以 ESP32 微控制器为核心, 搭载 AS7265x 多光谱传感器获取 410–940 nm 波段 18 通道漫反射光谱数据, 采用锂电池与 IP5306 芯片实现充放电管理, 通过 OLED 屏实时显示测量结果。采集 86 片草莓叶片样本光谱数据, 以 TYS-3N 叶绿素仪读值为参考标准, 构建支持向量回归预测模型。测试结果表明, 模型测试集决定系数 R^2 为 0.95, 均方根误差 RMSE 为 2.2, 该检测仪兼具便携、快速与低成本优势, 可为草莓田间精准施肥与长势监测提供有效技术手段。

关键词: 叶绿素含量; 无损检测; 多光谱技术; 草莓叶片; 支持向量回归

DOI: 10.65976/3078-8145.2026.01.012

引言

草莓 (*Fragaria × ananassa* Duch) 是全球范围内种植规模较大的浆果类经济作物。联合国粮农组织的统计显示, 2023 年中国草莓栽培面积达到 15.63 万 hm^2 , 无论在种植面积还是总产量上都处于世界领先地位^[1]。叶绿素是植物进行光合作用必需的色素, 叶片中叶绿素含量的高低, 在相当程度上决定了植株的光合效率、氮素营养水平以及响应逆境的能力^[2]。若实时跟踪叶绿素含量, 对于制定草莓的灌水和追肥方案、最终提升果实产量和品级会有帮助^[3]。不过, 目前农业生产中沿用的叶绿素检测手段在实用性上存在明显短板^[4]。传统湿化学分析方法虽然测定精度较好, 但需要剪取叶片, 经历研磨、浸提、比色等多道工序, 检测的时间成本偏高, 很难在田间大规模快速检测的场合使用^[5]。手持式叶绿素计 (比如 TYS-3N 这类仪器) 实现了无损检测, 能直接读出叶片的 SPAD 读数, 但该读数的准确性容易受叶片肉质厚薄、细胞间隙差异等因素的影响^[6]。有必要开发一种成本不高、便于携带、并且能同时获取多个光谱参数的田间叶绿素检测手段。

多光谱传感技术的原理是利用叶片在不同波长处的反射率差异来推算叶绿素含量, 这为便携检测仪器提供了理论依据^[7]。因此, 本研究拟以 AS7265x 多光谱传感器、ESP32 微控制器和 OLED 显示模块作为核心器件, 设计制作一款手持式仪器, 专门用于草莓叶片的叶绿素田间快速无损检测, 为草莓的精准水肥调控提供数据基础。

1 硬件设计

1.1 硬件整体设计与工作原理

草莓叶片叶绿素含量检测仪的硬件系统由光谱采集模块、主控模块、供电管理模块、人机交互模块及机械壳体五部分构成。光谱采集端选用的是 AS7265x 多光谱传感器组, 它能够在 410 到 940 nm 波长区间内识别 18 个通道的反射光谱信息。主控端用的是一块 ESP32-WROOM-32 开发板, 工作内容包括操作传感器读取数据、对原始信号做预处理, 运行叶绿素含量反演的数学模型得到最终结果。供电端的设计思路是用一块 3.7 V 的锂聚合物电池搭配 IP5306 电源管理芯片, 为其他各个模块提供稳定的工作电压。人机交互部分则通过一只 0.96 英寸的 OLED 屏幕加几个轻触开关来实现在屏幕上显示检测结果, 按钮用来接收操作指令。外壳部分由光固化 3D 打印制成, 内部预留了定位结构并设计了遮光腔体, 这样传感器窗口就能和叶片表面紧密贴合, 外界杂散光不容易窜进去影响测量精度。

1.2 多光谱传感器选型

本研究采用 AS7265x 多光谱传感器芯片组, 该芯片组由 AS72651 (可见光波段)、AS72652 (可见-近红外波段) 及 AS72653 (近红外波段) 三颗子传感器级联而成, 共计提供 18 个光谱通道, 各通道中心波长覆盖 410 nm 至 940 nm, 半峰全宽 (FWHM) 为 20 nm。传感器内部集成纳米光干涉滤光片与 CMOS 光电二极管阵列, 出厂前已完成 35 counts/ ($\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)

课题项目: 商洛市科技计划项目“基于多波长光谱技术的草莓叶片叶绿素与氮含量快速检测技术研究” (编号: 2022-Z-0004); 陕西省大学生创新训练计划项目 (编号 S202511396067); 商洛学院博士启动基金项目“基于显微多光谱图像的羊乳中掺入牛乳检测方法机理” (编号: 21sky115)。

作者简介: 杨彪 (1993—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电气工程及其自动化。

的标准化辐射校准,无需用户二次标定。

1.3 主控模块选型

主控模块选用 ESP32-WROOM-32 开发板,其核心芯片为乐鑫科技推出的双核微控制器。通过 I²C 接口轮询 AS7265x 传感器数据;执行滑动平均滤波与一阶导数预处理算法;运行轻量化 SVR 模型反演叶绿素含量;驱动 SSD1306 控制器的 OLED 显示屏;响应 GPIO 外部中断以处理按键事件。

1.4 人机交互模块选型

显示模块选用 0.96 英寸 OLED 显示屏,驱动芯片为 SSD1306,分辨率为 128×64 像素,接口类型为 I²C。按键模块采用轻触开关,未按下时输出高电平,按下后输出低电平。按键连接至 ESP32 的 GPIO 引脚,配合外部中断服务函数实现短按启动测量、长按进入校准模式的功能区分。

1.5 壳体机械设计与整机组装

检测仪外壳采用 SolidWorks 软件参数化建模,由上盖、中框及底壳三部分构成。外形尺寸为 148 mm×52 mm×38 mm,整机质量约 135g。外壳使用 3D 打印机以 0.1 mm 层厚固化成型,表面经打磨处理。组装好的仪器内部如图 1 所示。



图 1 叶绿素含量检测仪

2 软件设计

2.1 软件整体架构

草莓叶片叶绿素含量检测仪的软件系统采用“下位机采集—上位机建模—下位机推理”的分层架构。下位机程序基于 Arduino IDE 环境以 C/C++ 语言编写,烧录于 ESP32 开发板,负责多光谱传感器驱动、数据预处理、人机交互响应及叶绿素含量实时反演;上位机建模程序采用 Python 语言开发,运行于 PC 端,承担光谱数据分析、特征波段筛选及预测模型训练任务。两者通过 USB 接口实现数据交换,训练完成的模型经轻量化转换后固化为 C 语言头文件,集成至下位机固件中,使检测仪具备脱离上位机的独立工作能力。

2.2 多光谱数据采集程序设计

下位机采集程序围绕 AS7265x 传感器芯片组展

开,通过 ESP32 的 I²C 总线与三颗子传感器依次通信。程序初始化阶段,首先配置 AS72651、AS72652 及 AS72653 的积分时间与增益寄存器。针对叶片叶绿素检测对蓝紫光波段信噪比的特殊要求,将 AS72651 的积分时间设置为 100 ms,增益设为 16×;AS72652 与 AS72653 保持 50 ms 积分时间及 8× 增益,以防止近红外通道数据饱和。初始化完成后,程序执行暗电流校准与白板参考校准:在传感器窗口完全遮蔽状态下连续采集 20 次,计算各通道暗噪声均值作为偏置扣除值;随后以标准聚四氟乙烯白板为参考目标,获取各通道满量程响应值,用于后续反射率计算。

采集流程由 GPIO 引脚连接的轻触按键触发。按键短按产生外部中断,中断服务函数置位测量标志位。主循环检测到标志位后,依次读取 AS72651、AS72652、AS72653 共 18 个通道的 AD 转换值,经暗电流扣除与反射率归一化处理后,将数据存储于长度为 18 的浮点型数组。为抑制随机噪声,程序对连续 3 次测量结果执行滑动平均滤波。

2.3 叶绿素含量预测模型嵌入

叶绿素含量预测模型的训练工作在上位机完成。首先,利用检测仪采集 86 片不同叶绿素水平的草莓叶片样本光谱数据,使用叶绿素仪获取每片叶片的 SPAD 读值作为参考真值。基于采集到的多光谱数据,使用 Python scikit-learn 库训练支持向量回归模型,模型参数经网格搜索优化。为实现 ESP32 端的独立推理,训练好的模型经 m2cgen 工具转换为纯 C 语言函数。

3 建模结果与模型验证

3.1 草莓叶片样本与标准值的测量

实验共采集 86 片草莓叶片样本,SPAD 值范围为 22.3–58.6,涵盖胁迫至正常生长的叶绿素水平,SPAD 值为叶绿素仪的输出值,该数值已被大量研究用作评价植物叶片叶绿素含量。为建立可靠的叶绿素含量预测模型,需获取草莓叶片样本的 SPAD 数值参考真值。本研究采用 TYS-3N 型叶绿素仪,对每片待测叶片进行 5 点测量,取平均值作为该叶片的 SPAD 读值。

3.2 建模结果

基于向量机回归(SVR)、线性回归(Linear Regression)、岭回归(Ridge Regression)算法建立的植物 SPAD 预测模型性能指标如表 1 所示。

表 1 三种算法建立的模型性能指标

算法	R^2	RMSE	RPD
SVR	0.95	2.1	3.5
线性回归	0.92	2.5	2.7
岭回归	0.88	3.2	2.3

SVR 算法建立的模型具有最佳的预测性能, 训练集 R^2 为 0.95, 对训练数据拟合程度高, RMSE 为 2.1, 说明误差较小, 性能最优。线性回归算法虽有一定拟合与泛化表现, 但误差控制、预测稳定性弱于 SVR。所以将其选作最终的预测模型并通过 m2cgen 工具转换为 C 语言代码嵌入 ESP32。

3.3 仪器性能验证

为评估所研制检测仪的实际应用效果, 另采集 36 片未参与建模的草莓叶片作为独立验证样本, 使用本研究仪器与 TYS-3N 叶绿素仪进行对比测量。每片叶片重复测量 3 次取均值, 以叶绿素仪读值为横坐标、检测仪预测值为纵坐标绘制散点图并拟合线性回归方程。散点图如图 2 所示。结果表明, 两者呈高度线性相关 $R^2=0.95$, 均方根误差 RMSE 为 2.2。

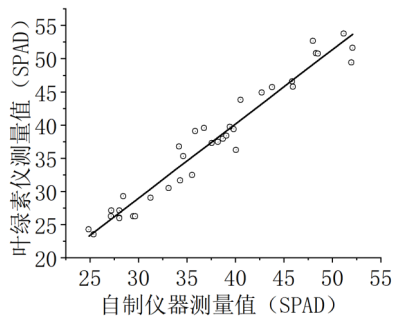


图 2 自制仪器测量值与叶绿素仪测量值

4 结论

本研究设计了一款基于 AS7265x 多光谱传感器与

ESP32 单片机的手持式草莓叶片叶绿素检测仪。测试集决定系数 R^2 达 0.95, RMSE 为 2.2 SPAD, 单次检测耗时 1s, 可满足田间快速无损检测需求。

参考文献:

- [1] 李薇, 王哲, 刘妍, 等. 我国草莓产业发展新形势、存在的问题及建议 [J]. 中国南方果树, 2025, 54(02): 240-248.
- [2] 杨梦宇, 徐琳贇, 宋义前, 等. 不同补光灯对温室草莓生长发育和光合特性的影响 [J]. 北方园艺, 2024, (20): 30-36.
- [3] 李巧娜, 李斐, 杨海波. 优选小波函数提高马铃薯叶片叶绿素的高光谱估算精度 [J]. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(11): 2252-2265.
- [4] 朱小青, 李红, 陈超, 等. 基于高光谱成像技术的生菜叶片叶绿素和氮素含量快速无损检测 [J]. 排灌机械工程学报, 2025, 43(09): 964-972.
- [5] 金霞, 金志芳, 孙光举, 等. 分光光度法测定海水中叶绿素含量的研究 [J]. 广州化工, 2010, 38(04): 132-133+136.
- [6] 于渤, 韩书庆, 孙明. 便携式叶绿素计的设计与性能测试 [J]. 农机化研究, 2011, 33(03): 96-99.
- [7] YANG B, GUO W, HUANG X, et al. A portable, low-cost and sensor-based detector on sweetness and firmness grades of kiwifruit [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 179: 105831.