doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.23.010

基于主动反射与数字锁相放大技术的手持式多波段作物叶绿素与氮素检测仪研究

张　瑶[1,2]　刘健蕾[1,2]　仝方慧[1,2]　何祎航[1,2]　张　漫[1,2]

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083;
2. 中国农业大学智慧农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为满足田间作物养分信息快速、无损检测的需求,研制了一种手持式多波段作物养分检测仪。该仪器采用 450、545、590、645、750、800、1 050 nm 7 个特征波长,构建环形发射、中心接收的主动反射光路,并配置可更换的大、小孔径探头,以适应不同叶片形态和测量区域。硬件系统以 STM32F411 为核心,采用 MAIN、LED、LCD 和 KEY 4 块功能板的分板式架构;软件系统基于 HAL 库和 μC/OS-Ⅱ实时操作系统,实现光源驱动、信号采集、反射率解算、模型计算、结果显示、定位和数据上传。仪器采用 8 kHz 光源调制、256 kHz 同步采样和双相数字锁相处理提取有效反射信号,并结合标准反射板标定和现场参比的策略,提高反射率测量的准确性与稳定性。性能试验结果表明,仪器对 50% 和 10% 标准反射板测量的平均绝对误差分别为 0.394 8、0.117 9 个百分点;两台仪器测量真实叶片时,7 个波长反射率的相关系数为 0.946 ~ 0.993,均方根误差(RMSE)为 0.152 ~ 1.630 个百分点。进一步以 7 个波长反射率和 7 个植被指数构成候选特征,通过特征筛选和五折交叉验证,分别建立小麦、水稻叶片叶绿素和全氮含量检测模型。小麦、水稻叶绿素含量检测模型的决定系数(R^2)分别为 0.821 和 0.859,平均绝对百分比误差(MAPE)分别为 5.66% 和 4.95%;小麦、水稻全氮含量检测模型的 R^2 分别为 0.639 和 0.691,MAPE 分别为 6.07% 和 9.32%。结果表明,该仪器具有较好的反射率测量准确性、稳定性和台间一致性,能够有效检测小麦和水稻叶片的叶绿素含量,并对叶片全氮含量具有一定的检测能力,可为田间作物养分的快速检测提供技术支持。

关键词: 作物养分检测仪; 主动光源; 多波长; 数字锁相放大技术

中图分类号: S126　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)23-0108-14　　**OSID**:

Handheld Multiband Crop Chlorophyll and Nitrogen Content Detector Based on Active Reflectance and Digital Lock-in Amplification

Zhang Yao[1,2]　Liu Jianlei[1,2]　Tong Fanghui[1,2]　He Yihang[1,2]　Zhang Man[1,2]

(1. *College of Information and Electrical Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Smart Agriculture System Integration*, *Ministry of Education*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Aiming to meet the demand for rapid and non-destructive assessment of crop nutrient status under field conditions, a handheld multiband crop nutrient detector was developed. The instrument employed seven characteristic wavelengths of 450 nm, 545 nm, 590 nm, 645 nm, 750 nm, 800 nm, and 1 050 nm, and adopted an active reflectance optical configuration with annular illumination and central detection. Interchangeable large- and small-aperture probes were provided to accommodate different leaf morphologies and measurement areas. The hardware system was built around an STM32F411 microcontroller and consisted of four functional boards: MAIN, LED, LCD, and KEY. The software system was based on the HAL library and the μC/OS-Ⅱ real-time operating system, enabling light-source control, signal acquisition, reflectance calculation, model inference, result display, positioning, and data upload. Effective reflectance signals were extracted by using 8 kHz light-source modulation, 256 kHz synchronous sampling, and dual-phase digital lock-in processing. Standard reflectance panel

收稿日期: 2026-08-11　修回日期: 2026-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(32471993)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2026RC040)和中国农业大学 2115 人才工程项目

作者简介: 张瑶(1988—),女,副教授,博士,主要从事农业信息获取与智能决策研究,E-mail: zhangyao@cau.edu.cn

通信作者: 张漫(1975—),女,教授,博士,主要从事精细农业与智慧农业、农业机械导航定位等研究,E-mail: cauzm@cau.edu.cn

calibration and in-field referencing were further employed to improve the accuracy and stability of reflectance measurements. Performance tests showed that the mean absolute errors for the 50% and 10% standard reflectance panels were 0.394 8 and 0.117 9 percentage points, respectively. For measurements of real leaves using two instruments, the correlation coefficients across the seven wavelengths ranged from 0.946 to 0.993, while the root mean square errors (RMSE) ranged from 0.152 to 1.630 percentage points. Seven-band reflectance values and seven vegetation indices were subsequently used as candidate features. Through feature selection and five-fold cross-validation, prediction models were developed for leaf chlorophyll and total nitrogen contents in wheat and rice. The coefficients of determination (R^2) for wheat and rice chlorophyll-content models were 0.821 and 0.859, with mean absolute percentage errors (MAPE) of 5.66% and 4.95%, respectively. The corresponding R^2 values for wheat and rice total-nitrogen-content models were 0.639 and 0.691, with MAPE values of 6.07% and 9.32%, respectively. These results indicated that the developed instrument can provide satisfactory reflectance measurement accuracy, stability, and inter-instrument consistency. It can effectively estimate leaf chlorophyll content in wheat and rice, which showed potential for estimating leaf total nitrogen content, thereby providing technical support for the rapid field assessment of crop nutrient status.

Key words: crop nutrient detection instrument; active light source; multiband; digital lock-in amplification technology

0　引言

作物生理及养分状况与叶片光合能力、群体生长、干物质积累和产量形成密切相关，是开展作物生长监测、养分诊断与施肥决策的重要依据[1]。其中，叶绿素是植物吸收和转换光能的主要光合色素，其含量能够反映叶片光合活性和生长状态；氮素是叶绿素、蛋白质和核酸等物质的重要组成元素，对作物光合作用和生物量积累具有重要影响[2]。传统作物叶绿素与氮素含量测定主要依赖理化分析方法，例如采用分光光度法测定叶绿素含量[3]，采用凯氏定氮法或杜马斯燃烧法测定氮素含量[4]。这些方法虽然分析精度较高，但存在破坏性采样、试剂消耗量大、操作过程复杂和检测周期较长等问题[5]，难以满足大田作物全生育期、高频次和快速监测需求[6]。近年来，光谱无损检测技术通过获取作物叶片或冠层的反射光谱，并结合定量模型反演作物生理生化参数，为作物生理与养分状况的快速、无损诊断提供了有效手段[7-9]。

作物光谱检测仪器依据光源性质，可分为无源型和有源型。无源型仪器依赖自然光照，以 ASD FieldSpec 系列地物光谱仪为代表，因其宽波长、高光谱分辨率的优势，广泛用于获取作物冠层及叶片的连续反射光谱信息。然而，Ding 等[10]对被动光谱传感器进行研究后指出，被动测量结果容易受到太阳高度角、云层覆盖和辐照度变化的影响。此类测量通常需要在测量前及光照条件变化后进行白板校正，对测量时间、仪器姿态和天气条件要求较高，不利于田间高频次连续测量。

为降低对自然光照条件的依赖，有源型仪器通过内置光源照射被测对象。依据光线在叶片上的传输方向，有源仪器又可划分为透射式和反射式两种类型。SPAD-502 和 N-Tester 是典型的透射式仪器，其光源与探测器分别位于叶片两侧，测量时通过夹具形成相对固定的测量距离和局部遮光环境，可快速获得叶绿素或氮素相关指标[11]。透射式结构能够减弱环境光干扰，但有效测量区域受夹持窗口尺寸限制，并要求叶片较好地覆盖和贴合测量窗口。对于细窄、卷曲或厚度差异较大的叶片，夹持和贴合状态可能影响测量结果。此外，此类仪器通常仅设置少量特征波长，获得的光谱信息相对有限。

GreenSeeker、Crop Circle ACS-470 和 RapidSCAN CS-45 等属于典型的冠层反射式有源仪器，其光源和探测器位于被测对象同侧，可在一定距离外获取作物冠层反射信息，便于田间移动作业和机械搭载[12-14]。在叶片尺度，孙红等[15]利用红光和近红外主动光源研制作物叶绿素检测装置。上述研究表明，主动反射式结构具有较好的田间应用适应性，但有源照明并不能完全消除环境光影响。在开放田间环境中，太阳辐射作为背景分量与主动反射信号共同进入接收通道，增大接收电路的直流基线并压缩模拟前端的有效动态范围；背景光过强时，还可能造成前端饱和，影响微弱主动反射信号的稳定提取。

针对环境光干扰，现有研究采用光环境校正、参考光补偿和前端滤波等方法[16-18]。这些方法主要通过检测、校正或滤除背景分量，减小环境光对测量结果的影响。但在环境光变化剧烈场景下，校正效果有限，且电路实现较为复杂。

另一种方法是对主动光源进行调制，并利用锁

相解调提取目标信号[19]。锁相放大通过提取与光源调制频率一致的信号,抑制环境光和随机噪声的干扰[20]。但模拟锁相依赖乘法器和滤波器等硬件,对于多波长便携式装置,电路复用和参数调整较为复杂。

数字锁相由处理器完成信号解调和幅值计算,参考频率、采样点数及积分窗口可通过软件设置,并可利用同相、正交双路解调减小相位差对幅值计算的影响[21-23],更适合多波长顺序采集和嵌入式实现。然而,锁相解调主要抑制与调制频率不相关的背景和噪声,不能直接补偿光源输出、探测器响应及模拟调理电路增益随温度变化产生的幅值漂移[24],因此仍需通过参比修正仪器响应。

基于此,本文设计一种基于主动反射与数字锁相放大技术的作物叶片叶绿素和氮素双参数检测仪器。仪器采用七波长主动光源依次激励叶片,通过双相数字锁相解调提取各波长有效反射信号,并利用参比更新修正温度变化引起的系统响应漂移。通过标准漫反射板和真实叶片试验,评价仪器的测量准确性与稳定性、孔径一致性及台间一致性;分别建立小麦和水稻叶片叶绿素含量与全氮含量预测模型,验证仪器用于作物双参数检测的可行性。

1 仪器系统设计

1.1 同类产品对比与需求分析

为明确本文仪器的技术定位,围绕检测方式、波长配置、光源信号处理和检测指标,与典型作物光谱检测仪器进行横向对比,结果如表 1 所示。

表 1 典型作物光谱检测仪器横向对比

Tab. 1 Comparison of typical crop spectral detection instruments

仪器名称	生产企业	检测方式及尺度	特征波长/nm	光源及环境光处理方式	主要输出	特点与局限
ASD FieldSpec 4	ASD Inc.(美国)	无源反射式	350~2 500	依赖自然光与白板参比校正	连续光谱反射率	光谱范围宽,可为多参数反演提供丰富信息;受自然光变化影响,需重复进行白板参比测量,操作和数据处理较复杂
GreenSeeker-Handheld	Trimble Inc.(美国)	有源反射式/冠层	656、774	内置主动 LED 光源	NDVI	可快速获取冠层 NDVI;仅设置红光和近红外波长,输出指标单一
Crop Circle ACS-470	Holland Scientific Inc.(美国)	有源反射式/冠层	3 个可配置窄带通道	脉冲调制主动光源与带通滤光检测	反射率、植被指数	测量波长可通过滤光片配置;单次仅同步采集 3 个通道,需配套数据采集和后续处理,不能直接输出叶片养分指标
RapidSCAN CS-45	Holland Scientific Inc.(美国)	有源反射式/冠层	670、730、780	内置主动光源	反射率、NDVI、NDRE	集成度较高,可获取冠层反射率及植被指数;测量结果综合反映冠层结构和土壤背景
SPAD-502	Konica Minolta Inc.(日本)	有源透射式/叶片	650、940	内置双波长透射光源,夹持结构遮光	叶绿素相对含量	便携、测量速度快,可获取单叶测点的相对叶绿素信息;测量窗口较小、测量方式受限、易损伤叶片
N-Tester	Yara International ASA(挪威)	有源透射式/叶片	650、960	内置双波长透射光源,夹持结构遮光	N-Tester 值、氮肥推荐量	操作简便,可结合配套系统提供氮肥推荐量;需对多片叶片重复测量,不提供各波长反射率,主要反映群体氮素状态
本文仪器		有源反射式/叶片	七波长	光源调制、锁相解调与参比校正	反射率、叶绿素相对含量、全氮含量	可更换孔径探头适配不同作物,实现作物双指标检测;目前主要在小麦和水稻样本上完成验证,适用作物和田间场景仍需扩展

现有典型仪器在光谱信息量、检测方式、环境光处理和结果输出等方面各有特点,但本研究面向田间条件下叶片局部多波长测量、不同叶片形态适配、环境光干扰抑制以及多指标检测需求,从主动反射光路、多波长配置、可更换孔径探头和微弱反射信号提取等方面开展仪器总体设计。

1.2 整体流程设计

仪器采用主动多波长反射光谱测量技术获取叶片光谱信息。测量时,由按键触发采集流程,7 路光源按照设定顺序依次切换;叶片反射光经光电探测器接收后,采用数字锁相放大技术抑制环境光和随机噪声干扰,依次完成有效信号提取、反射率解算及养分含量反演。检测结果可在仪器端实时显示,并通过 4G 模块上传至云平台。此外,系统还集成了温度检测、电源管理、状态指示和定位等辅助功能,形成从光谱采集、信号处理到结果输出的完整工作流程。仪器整体架构如图 1 所示。

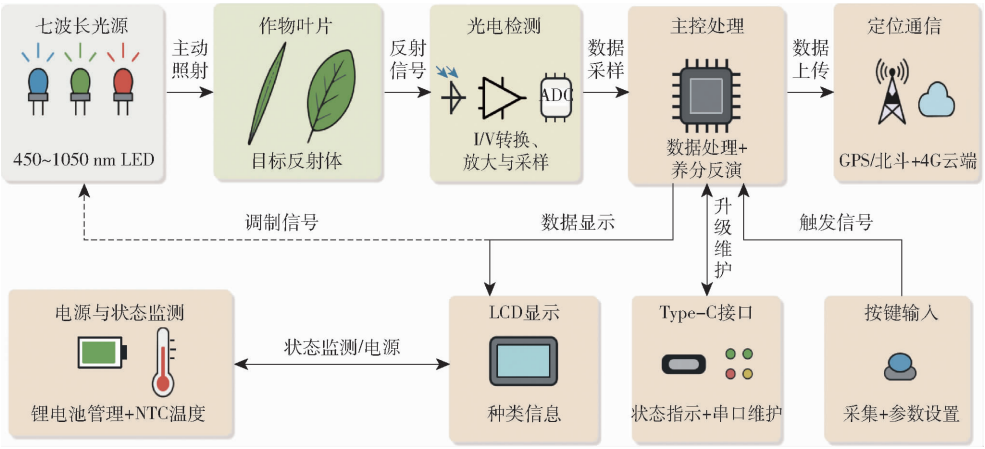


图 1　仪器整体架构

Fig. 1　Overall framework of instrument

1.3　整机结构设计

仪器采用便携式手枪形结构，外壳经 3D 打印成型，并进行抛光和喷漆处理，单机质量约为 350 g。主机外壳、握柄与前端测量部件采用一体化布局，内部板卡沿机身分层布置，在控制整机体积的同时，使重心靠近握持区域，便于田间单手持握和对准叶片。整机外形及内部布局如图 2 所示。

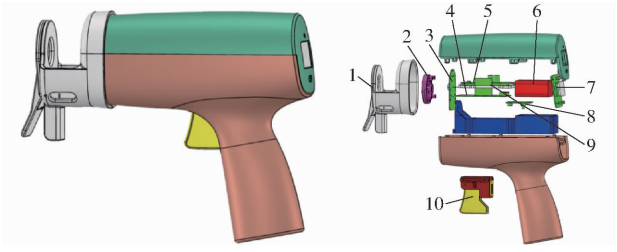


图 2　整机外形图与内部布局图

Fig. 2　Overall appearance and internal layout of machine

1. 前端适配结构　2. 光路结构　3. LED 板　4. MAIN 板　5. 通信模块　6. 锂电池　7. LCD 板　8. KEY 板　9. 定位模块　10. 按键

仪器内部采用分板式装配结构，主控制器、光源驱动与信号接收、显示与程序升级、按键输入等功能分别布置在不同 PCB 板上，板间通过连接器连接。各功能板可独立安装和拆卸，便于整机装配、电路调试及故障检修，也为后续更换板卡和调整局部结构提供了条件。

1.4　光路结构设计

为兼顾作物叶片在可见光区域和近红外区域的吸收及反射特征，选用 450、545、590、645、750、800、1 050 nm 共 7 个波长作为主动光源。各波长分别对应蓝光、绿光、黄光、红光、红边及近红外区域，既保留了与叶绿素和氮素含量相关的光谱信息，也为后续植被指数计算和养分反演模型构建提供输入。

光路采用环形发射、中心接收的主动反射结构，如图 3 所示。7 路 LED 通道均匀布置在接收通道周围，发射光以约 17.35°的角度射向叶片，并在距光电探测器约 34.2 mm 的测量位置汇聚，叶片反射光由中心接收通道送入光电探测器。该结构能够限定有效测量区域，减小光源与探测器相对位置变化造成的测量误差，并可与前端遮光罩和叶片适配结构配合使用。

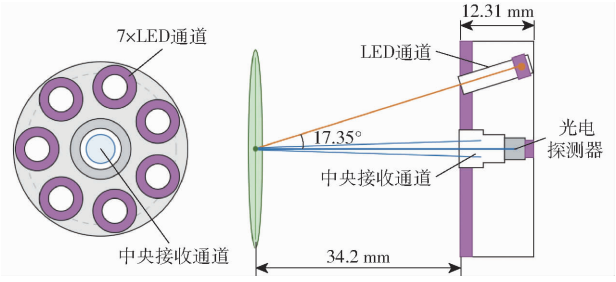


图 3　光路结构示意图

Fig. 3　Schematic of optical path structure

1.5　前端适配结构设计

为适应不同作物叶片形态及不同测试对象，仪器采用可更换式前端适配结构。前端适配结构一方面用于限定测量区域和维持稳定的光学几何关系，另一方面承担部分遮光、定位和被测对象约束等作用，是连接光路结构与田间应用场景的重要中间环节。

前端适配结构根据孔径和有无夹具分为 4 类，如图 4 所示。无夹具型结构用于反射校准，夹具型结构适用于常规叶片测量，可对叶片进行夹持定位。小孔径型结构适用于苗期细长叶片或窄叶作物，大孔径型结构适用于宽大叶片作物。通过更换不同前端结构，仪器能够在保持核心光电系统不变的前提下适配多种测试需求。

从工程实现角度看，前端适配结构的引入降低了整机在不同作物和不同测量场景之间切换时的改造成本，也提升了仪器平台化应用能力。对于面向田间推广的便携式检测仪器而言，这种设计思路有



图 4 前端适配结构图

Fig. 4 Design drawings of front-end adaptation structure

助于兼顾通用性与针对性。

1.6 硬件设计

仪器硬件由 MAIN 板、LED 板、LCD 板、KEY 板、定位通信模块及电池供电模块组成,各模块之间通过电源线、控制线和通信接口连接,硬件系统架构如图 5 所示。MAIN 板作为控制核心,与其他功能模块协同完成光谱信号采集、处理及结果输出。

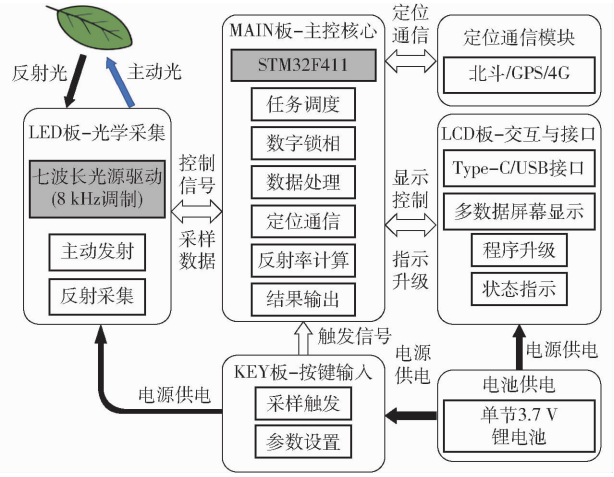


图 5 硬件系统架构图

Fig. 5 Hardware system architecture diagram

1.6.1 MAIN 板设计

MAIN 板以 STM32F411CEU6 微控制器为核心,系统时钟由 8 MHz 外部晶振提供。板上设置 SWD 下载调试接口,并引出 ADC、I^2C、SPI 及多路 UART 接口。其中,I^2C 接口用于控制 LED 驱动电路,SPI 接口用于驱动 LCD,ADC 通道用于采集光电信号、电池电压和温度信号,多路 UART 分别连接 GNSS 模块、外部通信模块及 USB 转串口电路。此外,板上采用 SP3485EEN 扩展 RS485 接口,并通过 SN74LVC2244 对 USB 串口与 RS485 串口信号进行缓冲和选通。MAIN 板通过连接器与 LED 板、LCD 板、KEY 板相连,完成控制信号、采样信号和电源的板间传输。

电源部分采用单节锂电池供电。AW32012CSR 用于电池充电与供电管理,TPS61089 升压电路为 GNSS 和外部通信模块提供工作电源,两路 XTP2201 稳压电路分别为主控和外围电路提供 3.3 V 电源。电池电压经电阻分压后接入 STM32 的 ADC 通道,用于监测电池电量;板载 NTC 热敏电阻用于采集仪器内部温度。MAIN 板还配置了 ZD24C08A 串行 EEPROM,用于存储校准系数和工作参数,使相关配置在断电后仍能保留。MAIN 板的主控与接口局部电路原理图及其 PCB 装配图分别如图 6a、6b 所示。

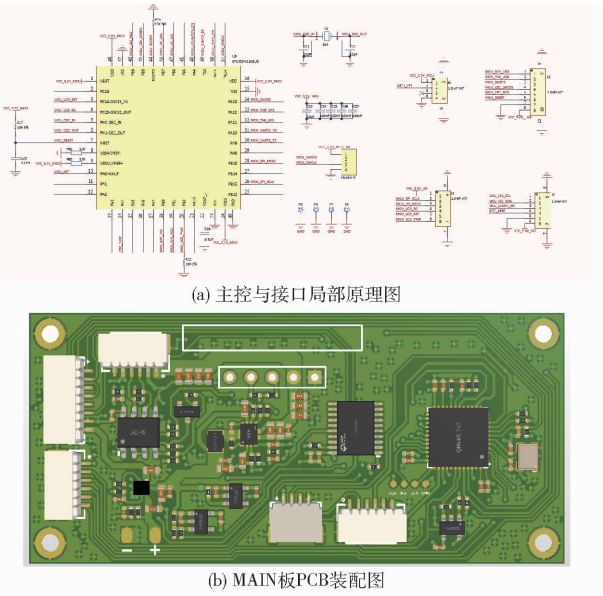


图 6 MAIN 板局部原理图及其 PCB 装配图

Fig. 6 Schematic and PCB assembly drawing of MAIN board

1.6.2 LED 板设计

LED 板主要由光源驱动和光电信号接收两部分组成,电路原理图如图 7a 所示。光源驱动部分采用 IS31FL3238 多通道 LED 驱动器,STM32 通过 I^2C 总线设置输出通道、电流及 PWM 工作状态。450、545、590、645、750、800、1 050 nm 7 路 LED 分别连接至驱动器输出端,由程序控制各波长依次点亮,并以

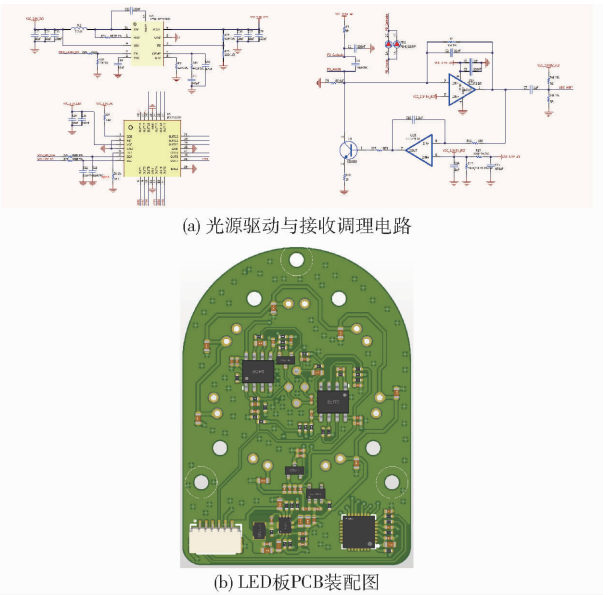


图 7 LED 板局部原理图及其 PCB 装配图

Fig. 7 Schematic and PCB assembly drawing of LED board

8 kHz 频率进行调制。板上采用 TPS61089 构成独立升压供电电路，为不同波长 LED 提供稳定的驱动电源。

接收部分以硅光电探测器为核心。叶片反射光在探测器中转换为光电流后，首先进入由 TLC272 运算放大器构成的跨阻转换电路，将微弱光电流转换为电压信号；随后经过后级放大和 RC 滤波网络，限制高频噪声并调整信号幅值。REF3020 产生 2.048 V 基准电压，为单电源条件下的模拟信号调理提供稳定偏置，使接收信号保持在 ADC 允许的输入范围内。调理后的信号传输至 MAIN 板，由主控完成同步采样和数字锁相处理。LED 板 PCB 装配图如图 7b 所示。

1.6.3　LCD 板设计

LCD 板由显示接口、USB 转串口、自动下载和状态指示电路组成，其局部原理图如图 8a 所示。显示部分采用 1.14 英寸 TFT 屏，通过 SPI 接口与 MAIN 板连接。屏幕背光由三极管开关电路控制，主控可根据工作状态开启或关闭背光，从而减少待机功耗。

USB 接口采用 Type－C 插座，CH340G 将 USB 信号转换为 UART 信号，并通过板间连接器与 STM32 串口相连，可用于程序下载和串口调试。CH340G 的 DTR 和 RTS 信号经 NPN、PNP 三极管组成的控制电路连接至 STM32 的 RESET 和 BOOT0 引脚，使设备能够自动进入串口下载模式，减少人工操作复位键和启动配置引脚的步骤。板上还设置红、绿双色状态指示灯，用于显示设备运行和通信状态。LCD 板 PCB 装配图如图 8b 所示。

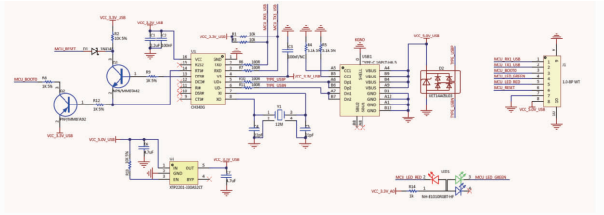
1.6.4　KEY 板设计

KEY 板采用独立轻触按键作为仪器的测量触发部件，其局部原理图如图 9a 所示。按键一端经 1 kΩ 电阻连接 3.3 V 电源，另一端接入主控的 MCU_KEY 信号端；信号端设置下拉电阻和电容，用于确定按键释放时的默认电平，并抑制机械触点抖动和高频干扰。按键按下后产生上升沿信号，可触发外部中断并唤醒处于待机状态的主控。

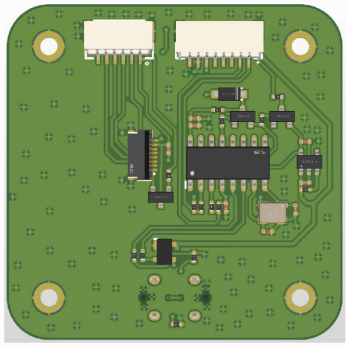
KEY 板连接器与 MAIN 板相连，该板只保留按键及必要的滤波元件，使按键能够根据手枪式外壳的握持位置独立安装，同时减少长连接线引入的干扰。KEY 板 PCB 装配图如图 9b 所示。

1.7　软件设计

软件以 STM32F411 为运行平台，底层外设驱动基于 HAL 库实现，并采用 μC/OS－Ⅱ实时操作系统管理各项功能。系统上电后依次完成时钟、GPIO、串口、I^2C、SPI、LCD、ADC、DMA、定时器、按键、LED



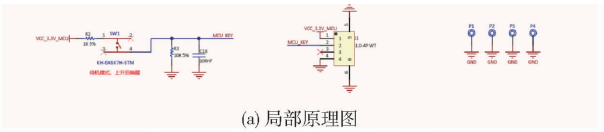
(a) 局部原理图



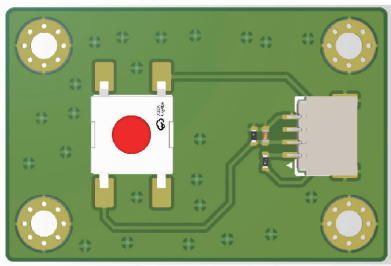
(b) LCD板PCB装配图

图 8　LCD 板局部原理图及其 PCB 装配图

Fig. 8　Schematic and PCB assembly drawing of LCD board



(a) 局部原理图



(b) KEY板PCB装配图

图 9　KEY 板局部原理图及其 PCB 装配图

Fig. 9　Schematic and PCB assembly drawing of KEY board

驱动、电池检测、温度检测、GNSS 及看门狗等硬件初始化，随后启动 μC/OS－Ⅱ并创建主任务、数据处理任务等。各任务按照设定优先级独立运行，使测量控制、状态监测、界面显示和通信处理能够并行执行。

数据处理任务负责响应按键事件并组织测量流程。待机状态下，每触发一次样本测量，系统依次完成 7 个波长光源控制、信号采集、反射率解算和模型计算，并将测量结果送至显示和通信单元。

此外，系统周期性读取电池电量、充电状态和仪器内部温度，并根据当前状态控制指示灯及 LCD 显示。电量较低且未充电时，红色指示灯保持点亮；充电过程中绿色指示灯以呼吸方式显示，充电完成后转为常亮。通过将状态监测与测量任务分开，可避免电量和温度信息刷新影响光谱采集过程。LCD 任务除负责界面信息更新外，还对 GNSS 报文进行解析并判断定位状态。测量完成后，软件将 7 个波

长原始响应、反射率、模型输出及电量、温度和定位信息按照通信协议进行封装，并通过 4G 模块上传至云平台。仪器软件总体流程如图 10 所示。

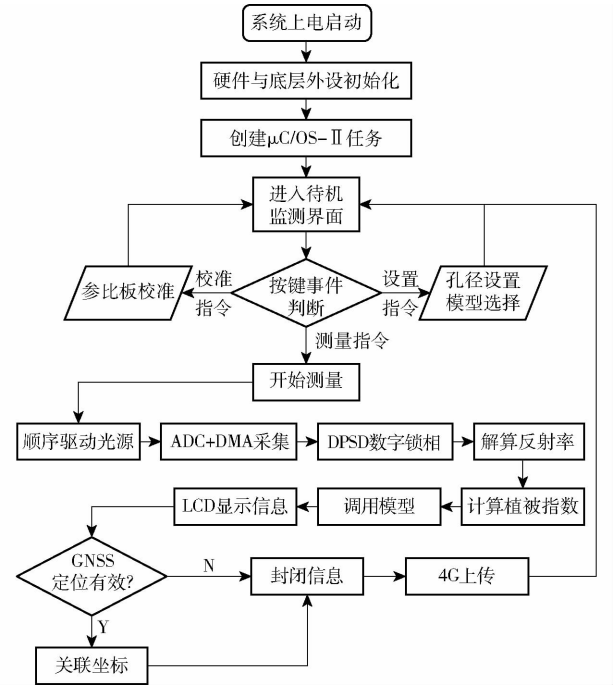


图 10 软件流程图

Fig. 10 Software flowchart

界面采用简化布局，如图 11 所示。顶部状态栏显示电量、温度、联网、定位和 ADC 状态，中部结果区显示氮素和叶绿素预测结果，底部提供测量、作物、孔径、校准 4 个功能入口。用户通过按键完成焦点切换、选项确认、作物选择、孔径设置、校准操作以及反射率查看。系统可根据作物自动匹配孔径，并在未选择作物或未校准时给出提示。该界面突出田间快速测量和结果直读的功能。

1.8 信号处理流程

仪器的信号处理经过调制发射、反射接收、光电转换、放大滤波、同步采样、数字解调及反射率解算等流程，如图 12 所示。按键触发测量后，主控依次选通 450、545、590、645、750、800、1 050 nm 7 个波长的 LED。各波长均以 8 kHz、50% 占空比方式调制，点亮 50 ms 后进入采样阶段，完成当前波长测量后

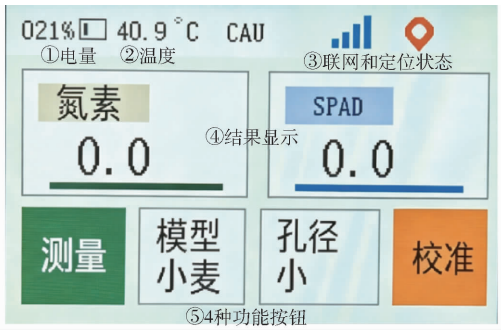


图 11 UI 界面

Fig. 11 UI interface

关闭光源并短暂延时，再切换至下一波长。

叶片反射光由测量窗口中心的光电探测器接收并转换为微弱光电流。LED 板接收前端采用跨阻放大电路完成 I/V 转换，随后经后级放大和滤波得到适于 ADC 输入的模拟信号。REF3020 提供 2.048 V 基准偏置，使单电源条件下的交流反射信号保持在 ADC 允许的输入范围内，调理后的信号传输至 MAIN 板。

采样阶段由定时器触发 ADC，采样率为 256 kHz，并通过 DMA 将 1 024 点数据写入缓存区，单次采样窗口为 4 ms。对于 8 kHz 调制信号，每个周期包含 32 个采样点，1 024 点数据覆盖 32 个完整周期。整周期采样有利于减小截断引起的频谱泄漏，DMA 传输则避免频繁中断对采样时序造成影响。

软件以光源调制频率为参考，对采样序列进行双相数字锁相处理，方式如下：设接收信号为 $x[n]$，其有效调制分量频率为 f_m，采样频率为 f_s，则接收信号计算公式为

$$x[n]=B\cos\left(\frac{2\pi f_m n}{f_s}+\varphi\right)+D+e[n] \tag{1}$$

式中 B——目标反射光在调制频率处的响应幅值

φ——接收信号相对于参考信号的综合相位差

D——环境光和电路偏置形成的直流分量

$e[n]$——第 n 个采样点的随机噪声

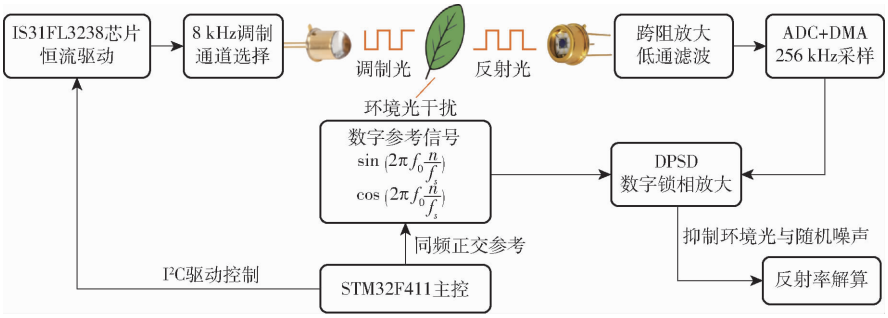


图 12 信号处理流程图

Fig. 12 Signal processing flowchart

双相数字锁相处理时，相关运算窗口对应完整的调制周期。在该短时窗口内，环境光背景可近似为直流分量。由于正弦和余弦参考序列在整数个完整周期内的均值为 0，环境光和电路偏置产生的直流分量可在相关运算中得到抑制。将 $x[n]$ 分别与同频余弦和正弦参考序列相乘并求平均，即

$$I=\frac{2}{N}\sum_{n=0}^{N-1}\left(x[n]\cos\left(\frac{2\pi f_m n}{f_s}\right)\right) \tag{2}$$

$$Q=\frac{2}{N}\sum_{n=0}^{N-1}\left(x[n]\sin\left(\frac{2\pi f_m n}{f_s}\right)\right) \tag{3}$$

式中　N——相关运算窗口内的采样点数

I、Q——同相相关分量和正交相关分量

发射驱动、模拟调理和 ADC 采样会引入相位差，单独使用 I 或 Q 均可能随相位变化而波动，将 I、Q 进行平方和开方，即

$$A=\sqrt{I^2+Q^2} \tag{4}$$

得到与相位无关的有效幅值 A。该幅值即为当前波长用于后续反射率解算的原始响应。

2　仪器标定与数据采集方法

2.1　参比标定与反射率解算

2.1.1　参比法设置

本部分旨在建立稳定一致的反射率标定方法。仪器直接采集的是各波长的调制响应幅值，并非标准反射率，因此采用参比法将原始响应转换为可比较的反射率。标定阶段，利用标准漫反射板建立仪器响应与真实反射率之间的对应关系；现场测量时，通过参比板响应更新仪器当前状态，修正温漂、光源衰减和器件老化引起的响应偏移，降低仪器对开机预热时间和固定测量条件的依赖。

标定阶段选用标称反射率分别为 95%、75%、50% 和 10% 的 4 块标准漫反射板，并分别测量其在 7 个波长下的调制响应。4 块反射板覆盖高、中、低反射率区间，可用于描述仪器在不同反射率水平下的响应变化。

不同波长下 4 块标准板的真实反射率如表 2 所示。由表可知，各标准板在 7 个波长上的真实反射率并非严格一致，而是在标称值附近存在小幅波动，因此在标定过程中需要按波长分别采用对应真值。

表 2　标准漫反射板各波长真实反射率

Tab. 2　True reflectance of standard diffuse reflectance plate in each band　%

波长/nm	95% 板	75% 板	50% 板	10% 板
450	95.64	74.52	49.06	8.63
545	95.43	75.15	50.15	9.14
590	95.37	75.26	50.41	9.36
645	95.30	75.22	50.53	9.52
750	95.14	74.74	49.79	9.54
800	94.94	74.78	49.80	9.67
1 050	94.24	74.33	49.29	9.94

2.1.2　非线性拟合

在标定模型方面，研究对比了各波长的线性与二次拟合结果，如图 13 所示。受 LED 输出、光电探测器响应和模拟调理电路等因素影响，仪器调制响应幅值与目标反射率之间并非严格线性关系。与线性模型相比，二次模型的决定系数更高、均方根误差更小，说明引入二次项后能够更准确地描述仪器响应幅值与反射率之间的关系。

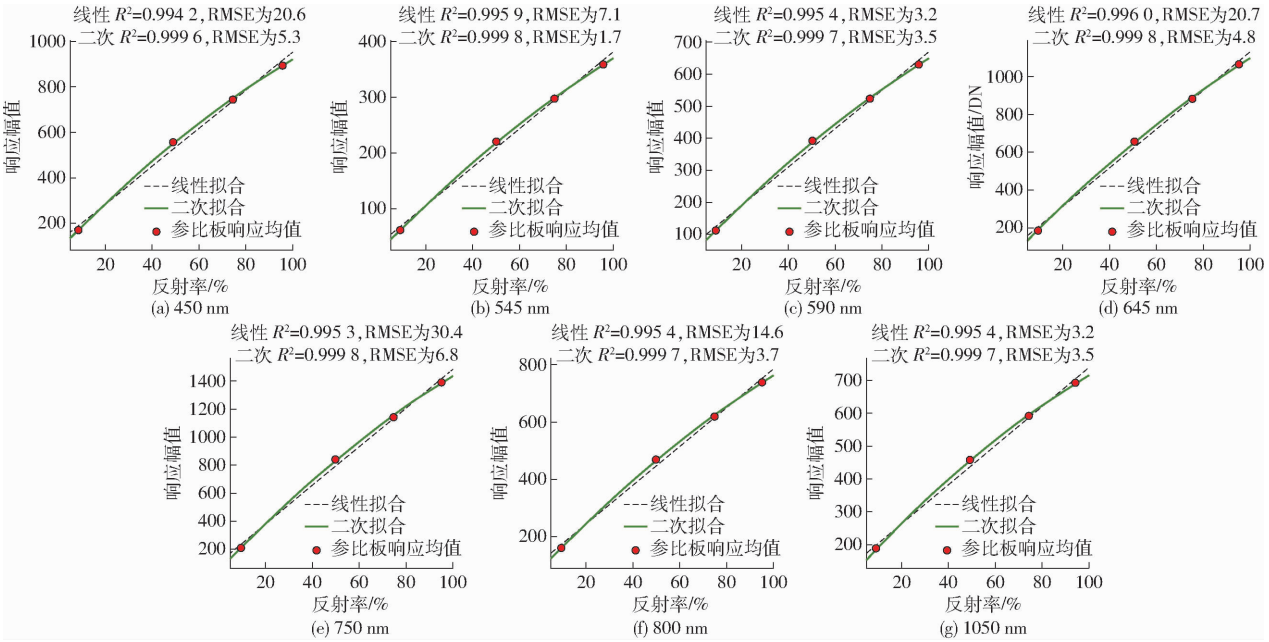


图 13　各波长线性及二次拟合曲线

Fig. 13　Linear and quadratic fitting curves for each band

为提高反射率解算精度,在参比标定基础上采用包含二次项的非线性标定模型,各波长的响应模型为

$$V = G(\alpha R^2 + R) + c \tag{5}$$

式中 V——仪器对被测目标的调制响应幅值

R——目标反射率

G——反映仪器当前工作状态的实时增益系数

α——波长相关的非线性修正系数

c——波长相关的固定偏置项

不同前端孔径分别配置对应的标定参数,可减小前端结构变化引入的系统偏差。

2.1.3 反射率解算

在反射率解算过程中,式(5)中的非线性修正系数 α 和固定偏置项 c 由标定时获得。现场测量前,首先使用 95% 参比板进行参比更新,获取仪器在当前工作状态下的参比响应 V_{95}。根据 95% 参比板在当前波长的真实反射率 R_{95},计算实时增益系数 G,即

$$G = \frac{V_{95} - c}{\alpha R_{95}^2 + R_{95}} \tag{6}$$

对于待测样本,设当前波长的响应幅值为 V_s,将其代入式(5)并求解关于反射率的一元二次方程,得到样本反射率 R_s

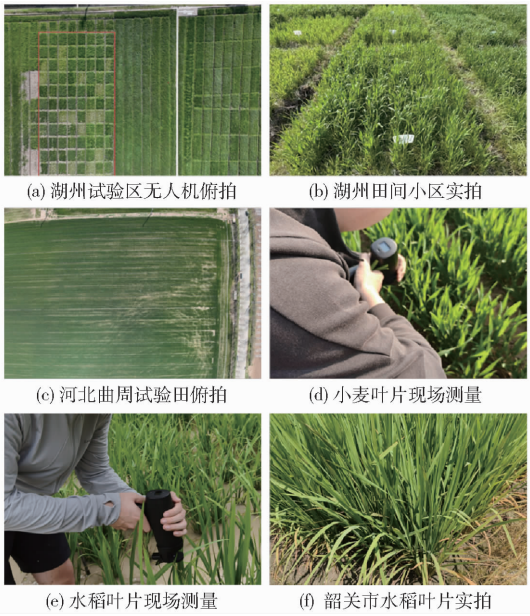
$$R_s = \frac{-1 + \sqrt{1 + \dfrac{4\alpha(V_s - c)}{G}}}{2\alpha} \tag{7}$$

该方法同时考虑了固定底噪、非线性响应和实时增益漂移,对不同环境和不同时间条件下的测量一致性更有利。

2.2 数据采集与样本构建

本研究对小麦、水稻开展了田间试验。小麦田间试验于 2026 年在浙江省湖州市农业科学研究院开展,试验地点坐标为北纬 30°48′44.8″、东经 120°11′27.9″,试验田分为 96 块区域,试验品种包括“浙华麦 1 号”“扬麦 20 号”和“扬麦 34 号”等,并采用变量施肥措施以扩大样本养分差异;在河北曲周试验站刘庄试验田开展试验,试验地点坐标为北纬 36°51′3.3″、东经 115°0′39.9″,试验品种为“中麦 578”,采用“四密一稀”方式种植并配合浅埋滴灌灌溉,两地分别采集 94 条和 148 条有效样本,共计 242 条。水稻试验于 2025 年、2026 年在广东省韶关市土苟背村(24°33′32″N, 113°31′25″E)开展,试验品种为“广东矮”与“玉针香”。采样时期选择拔节期和孕穗期,此阶段水稻叶片完全展开,叶片挺直、受光态势佳,是反映植株营养状况及穗分化的关键时期,共计 285 条有效样本。

采集过程中,首先使用本研究研发的仪器对作物叶片进行多波长反射光谱测量,随后采用 SPAD-502 叶绿素仪测定叶片的相对叶绿素含量(SPAD 值),并同步记录样本编号、采样位置等信息。现场测量完成后,将叶片样品带回实验室,依次进行杀青、烘干、研磨和过筛处理,最后采用杜马斯燃烧定氮法测定样品的全氮含量,全氮含量测定结果的单位为 mg/g。小麦及水稻田间数据采集与样本构建示意图见图 14。



(a) 湖州试验区无人机俯拍 (b) 湖州田间小区实拍

(c) 河北曲周试验田俯拍 (d) 小麦叶片现场测量

(e) 水稻叶片现场测量 (f) 韶关市水稻叶片实拍

图 14 小麦及水稻田间数据采集与样本构建示意图

Fig. 14 Schematics of field data collection and sample construction for wheat and rice

2.3 植被指数构建与特征选取

完成反射率解算后,选取 7 个波长的反射率作为基础光谱特征,覆盖可见光、红边和近红外区域,能够反映叶片色素吸收、细胞结构及水分状态变化所引起的光谱差异。为进一步突出不同波长之间的相对变化,在原始反射率基础上构建植被指数。

结合仪器的波长配置,本研究构建 NDVI[25]、GNDVI[26]、NDRE[27]、EVI[28]、NGRDI[29]、VARI[30] 和 NDWI[31] 共 7 个指数。其中,NDVI、GNDVI 和 NDRE 分别利用红光、绿光及红边波长与近红外波长之间的差异;EVI 综合利用蓝光、红光和近红外波长;NGRDI 和 VARI 主要表征可见光范围内绿光、红光和蓝光反射率的相对变化。由于仪器未配置标准 NDWI 通常采用的短波红外波长,本文利用 800、1 050 nm 反射率构建归一化差值指数,用于表征两个近红外波长之间的反射差异。考虑到部分植被指数由原始波长组合得到,候选特征之间可能存在信息重叠,因此训练过程中并未将 14 个特征固定用于所有模型,而是根据不同模型的特性进行特征筛选。

随后以交叉验证均方根误差为依据确定各模型的特征数量和特征组合。由此获得适用于不同作物和预测模型的输入特征子集，减少冗余特征对模型泛化能力及嵌入式运行效率的影响。

3　结果与分析

3.1　仪器性能测试

3.1.1　准确性与稳定性测试

仪器开机后，LED 光源、光电探测器及模拟调理电路的工作状态会随温度变化，可能造成输出响应漂移。为分析温度变化对仪器测量结果的影响，并验证参比更新方法的校正效果，开展了温漂试验。

使用 5 台仪器，仪器置于标准反射板表面进行连续测量，并同步记录机内温度及各波长反射率变化，结果如图 15 所示。

不同设备各波长的测量结果均随温度变化产生不同程度的漂移，且漂移方向和幅度存在差异，部分测量值随温度升高而增大，部分则呈下降趋势，说明温度对仪器的影响具有设备和波长差异。

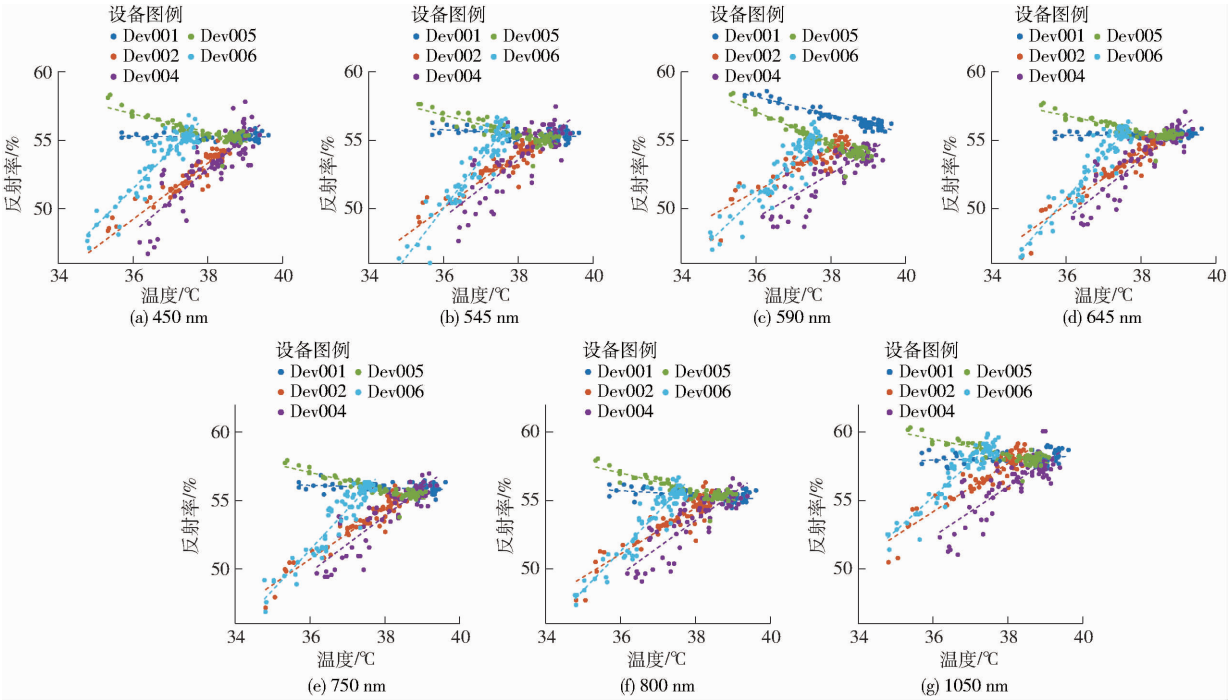


图 15　不同仪器测量的反射率随温度变化散点图

Fig. 15　Scatter plots of reflectance versus temperature measured by different instruments

采用参比校正后，进行了单机验证，从开机到温度稳定过程中，分别对 10% 和 50% 标准漫反射板进行连续测量，结果如图 16 所示。可以看出，各波长反射率整体围绕对应真值附近波动，曲线随测量序号变化基本保持平稳，未出现明显漂移。

为定量评价参比校正后的准确性与重复性，计算各波长测量结果相对标准反射率的绝对误差、均方根误差和标准差，结果见表 3。50% 和 10% 反射板的平均绝对误差分别为 0.394 8、0.117 9 个百分点，平均标准差分别为 0.696 2、0.347 2 个百分点。

引起的响应漂移，同时使仪器在中、低反射率条件下保持较小的测量误差和较高准确性与稳定性，并能降低仪器对固定开机预热时间的依赖。

3.1.2　孔径一致性测试

仪器配备大、小两种孔径探头，以满足不同尺寸叶片及不同测量区域的检测需求。探头孔径改变后，测量区域、光源照射范围及光信号接收效率均会发生变化，可能导致不同孔径下的响应幅值存在差异。为减小探头结构变化引入的系统偏差，仪器针对两种孔径分别设置了相应的非线性标定参数。

试验选取同一台仪器，分别安装大孔径和小孔径探头，并调用对应的标定参数。在相同环境条件下，使用两种探头对同一块 50% 标准漫反射板进行连续重复测量，记录 7 个波长的反射率，并与各波长标准反射率进行比较，结果如图 17 所示。

由结果可知，大、小孔径探头在 7 个波长上的测量结果均围绕对应标准值小幅波动，连续测量过程中未出现明显的趋势性变化。两种孔径下的反射率整体较为接近，两种孔径探头均能保持较稳定的反射率输出，且测量结果与标准反射率具有较好的一致性。因此，仪器可根据叶片尺寸和测量需求更换前端探头，并通过调用对应的标定参数保证反射率解算结果的一致性。

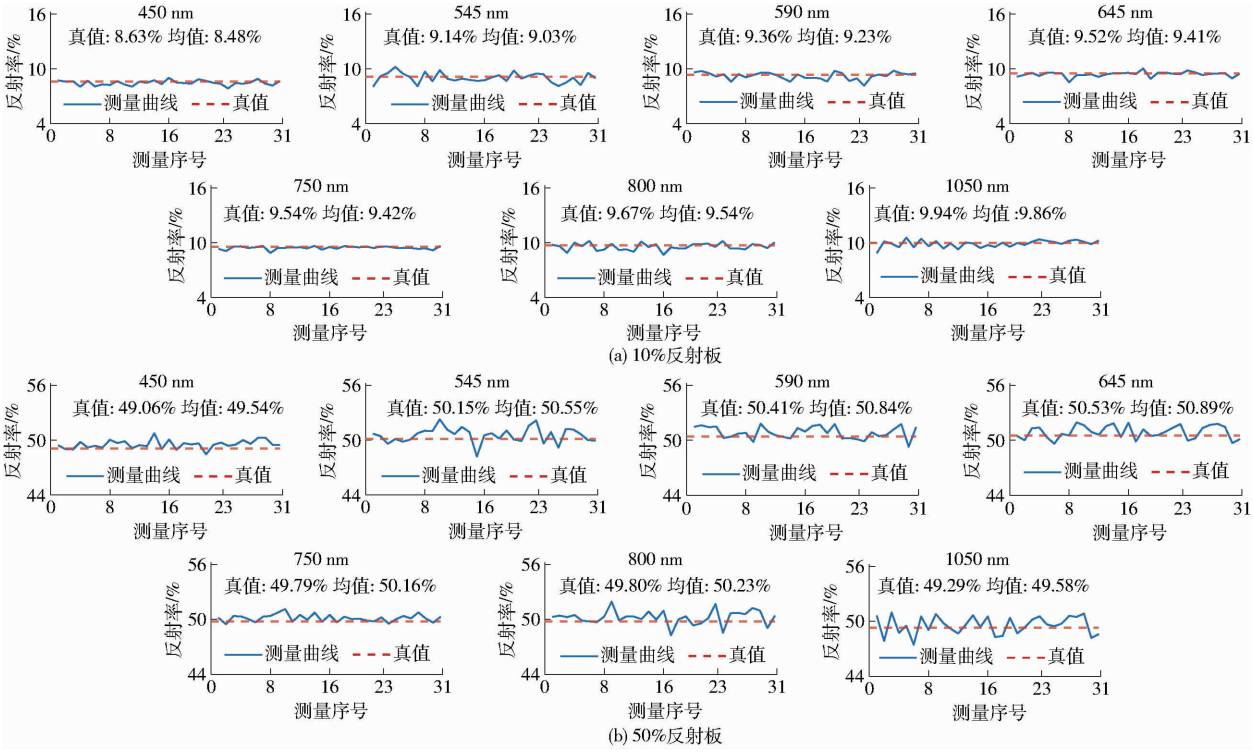


图 16 校正后连续测量结果图

Fig. 16 Continuous measurement results after calibration

表 3 仪器重复测量稳定性统计数据

Tab. 3 Statistical data of prototype repeatability measurement stability

反射板	平均绝对误差/个百分点	均方根误差/个百分点	平均标准差/百分点	最大标准差/百分点
50%	0.394 8	0.398 8	0.696 2	0.990 9
10%	0.117 9	0.119 9	0.347 2	0.542 7

3.1.3 不同仪器间测量一致性试验

为进一步评价不同仪器之间的测量一致性,使用 5 台设备在相同测量条件下分别对 75%、50%、10%标准反射板进行测量,并观察 7 个波长反射率。图 18 给出了 5 台设备在不同波长上的反射率均值对比结果。可以看出,5 台仪器在 3 种标准反射板上的测量曲线整体接近对应真值,设备间离散程度

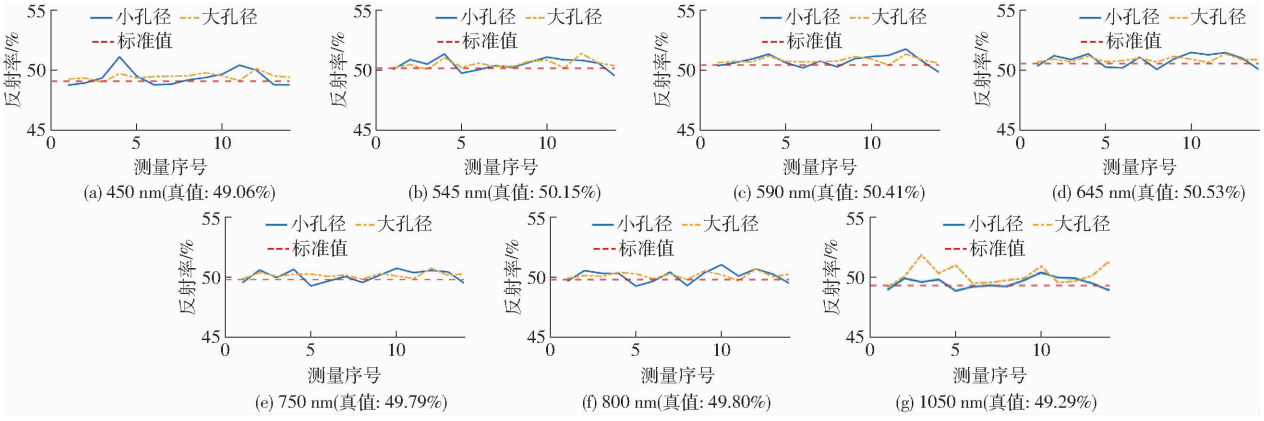


图 17 不同孔径探头连续测量结果

Fig. 17 Continuous measurement results of probes with different apertures

较小,表明测量结果具有良好的一致性。

在标准反射板试验基础上,进一步采用真实叶片检验仪器的台间一致性。选取同一批 80 片作物叶片,由两台仪器按相同顺序逐片测量,比较 7 个波长的反射率,结果如图 19 所示。两台仪器在各波长上的测量曲线变化趋势基本一致,能够同步反映不同叶片间的光谱差异。

通过平均偏差、均方根误差(RMSE)和 Pearson 相关系数 r 评价不同仪器测量结果的一致性,结果见表 4。

两台设备在 7 个波长上的相关系数为 0.946 ~ 0.993,RMSE 为 0.152 ~ 1.630 个百分点;其中,

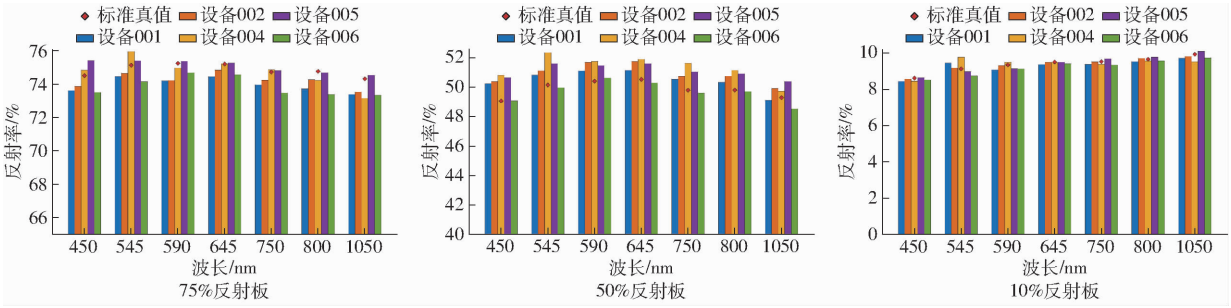


图 18　不同仪器测量标准反射板反射率一致性对比图

Fig. 18　Consistency comparison of standard reference panel reflectance measured by different instruments

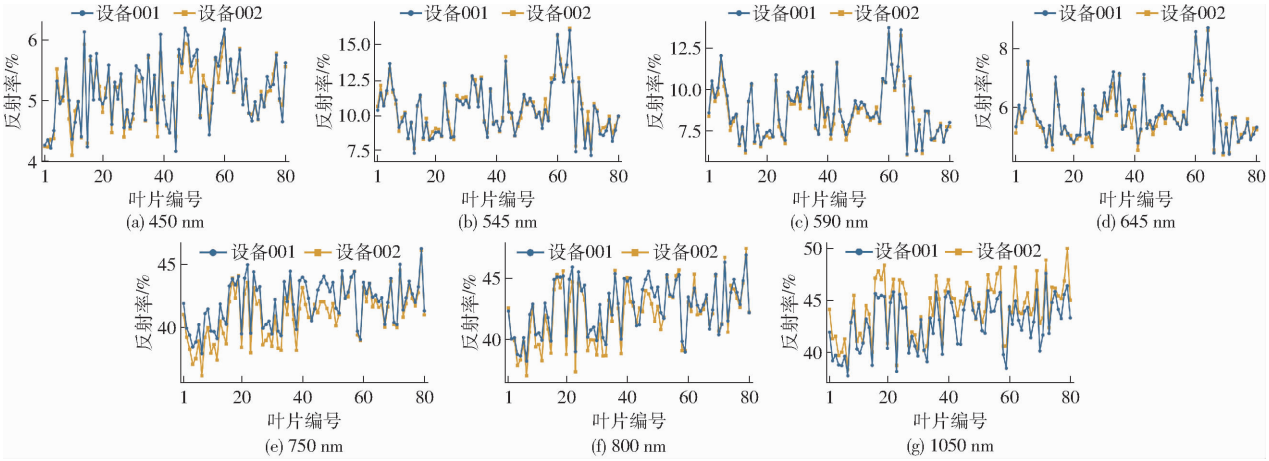


图 19　真实叶片反射率对比图

Fig. 19　Comparison of real-leaf reflectance measured by two instruments

450、545、590 nm 波长的 RMSE 均不超过 0.316 个百分点，750～1 050 nm 波长的 RMSE 有所增大，但相关系数仍保持在 0.946 及以上，表明不同设备对真实叶片具有较一致的响应。

表 4　真实叶片反射率台间一致性统计结果

Tab. 4　Statistical results of inter-instrument agreement of actual leaf reflectance

波长/nm	平均偏差/个百分点	均方根误差/个百分点	r
450	0.042	0.152	0.962
545	0.151	0.316	0.988
590	0.178	0.266	0.993
645	0.077	0.168	0.986
750	0.927	1.122	0.953
800	0.586	0.957	0.949
1 050	1.380	1.630	0.946

3.2　模型构建与分析

为评价仪器光谱数据对不同作物养分指标的表征能力，本研究分别建立小麦、水稻叶片叶绿素含量和全氮含量 4 个检测模型。现有嵌入版本对应的小麦叶绿素、水稻叶绿素、小麦全氮和水稻全氮样本数分别为 242、285、169 和 180。

本研究将构建的 14 个光谱特征作为初始候选变量，包括 7 个波长反射率和 7 个植被指数，建模过程中比较随机森林（RF）、梯度提升决策树（GBDT）、偏最小二乘回归（PLSR）、支持向量回归（SVR）和岭回归（Ridge）5 种方法。采用 5 折交叉验证进行模型训练与评价，同时完成特征筛选和超参数寻优。以各折平均 RMSE 最小为主要选择依据，并结合 R^2、MAE 和 MAPE 确定模型配置。

考虑到不同算法对变量信息的利用方式不同，特征筛选采用与模型相适应的方法。RF 和 GBDT 依据树模型的特征重要性进行递归特征消除；SVR 通过内层验证样本的置换重要性确定特征排序。对于预测误差接近的候选模型，进一步比较输入维度、模型存储量和计算复杂度，优先选择适合嵌入式运行的配置。最终 4 类任务模型效果如表 5 所示。

3.2.1　叶绿素含量模型

由表 5 可知，小麦叶绿素含量预测中，GBDT 取得最高 R^2 和最低 RMSE，将 12 维 GBDT 选为最终模型，其参数设置为：n_estimators = 160、learning_rate = 0.05、max_depth = 4、min_samples_leaf = 3、subsample = 0.70。水稻叶绿素含量预测中，SVR 的 R^2 最高，同时 RMSE、MAE 和 MAPE 均最低，因此选用 12 维特征输入的 SVR 模型，参数设置为 $C = 10$、$\gamma = 0.03$、$\varepsilon = 0.10$。在上述输入特征和模型参数保持不变的情况下，采用 5 折交叉验证获得各样本的预测值，小麦、水稻叶绿素含量的实测值与预测值关系如图 20 所示。

表 5 4 类预测任务中 5 种模型的 5 折交叉验证性能

Tab. 5 Five-fold cross-validation performance of five models for four prediction tasks

预测对象	方法	特征数	R^2	RMSE	MAE	MAPE/%
小麦全氮含量	RF	7	0.639	2.862	2.273	6.07
	GBDT	10	0.639	2.861	2.308	6.16
	PLSR	10	0.586	3.066	2.545	6.87
	SVR	12	0.628	2.904	2.366	6.35
	Ridge	5	0.594	3.033	2.502	6.74
水稻全氮含量	RF	14	0.671	4.621	3.335	9.76
	GBDT	7	0.647	4.787	3.457	10.22
	PLSR	14	0.680	4.559	3.493	10.40
	SVR	12	0.691	4.477	3.213	9.32
	Ridge	9	0.690	4.488	3.316	9.83
小麦叶绿素含量	RF	14	0.794	3.268	2.619	6.08
	GBDT	12	0.821	3.046	2.455	5.66
	PLSR	7	0.746	3.624	2.791	6.46
	SVR	12	0.811	3.132	2.403	5.56
	Ridge	11	0.770	3.451	2.708	6.30
水稻叶绿素含量	RF	12	0.832	2.739	2.055	5.58
	GBDT	14	0.832	2.741	2.017	5.52
	PLSR	14	0.843	2.650	1.907	5.19
	SVR	12	0.859	2.506	1.833	4.95
	Ridge	12	0.855	2.541	1.873	5.10

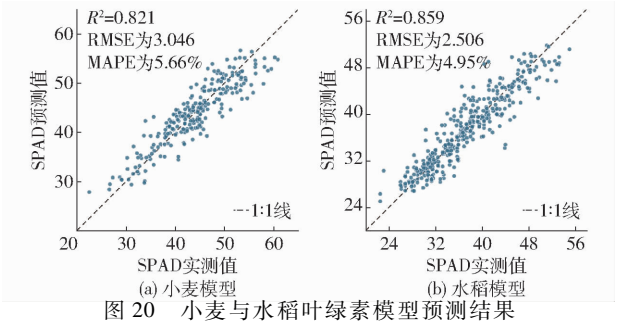


图 20 小麦与水稻叶绿素模型预测结果

Fig. 20 Model prediction results of relative chlorophyll content in wheat and rice

小麦叶绿素含量检测模型的 R^2 为 0.821，RMSE 为 3.046，MAPE 为 5.66%；水稻叶绿素含量检测模型的 R^2 为 0.859，RMSE 为 2.506，MAPE 为 4.95%。两种作物模型的 R^2 均高于 0.82，MAPE 均低于 6%，表明仪器获得的多波长反射率及其组合特征能够较好地反映叶片叶绿素含量的变化。

3.2.2 氮素含量模型

由表 5 可知，小麦全氮含量预测中，RF 与 GBDT 的 R^2 和 RMSE 十分接近，而 RF 的 MAE 和 MAPE 更低，且输入维数由 10 维减少至 7 维，因此综合预测性能与嵌入式部署复杂度，最终选择 RF，其参数设置为：n_estimators = 40、max_depth = 10、min_samples_leaf = 1、max_features = 1.0。水稻全氮含量预测中，采用 RBF 核函数的 SVR 模型取得了最高的 R^2，且 RMSE、MAE 和 MAPE 均为最低，因此选用 12 维特征输入的 SVR 模型，其参数设置为 $C = 100$、$\gamma = 0.01$、$\varepsilon = 2.00$。在上述输入特征和模型参数保持不变的条件下，采用 5 折交叉验证获得小麦和水稻全氮含量的预测结果，实测值与预测值的关系如图 21 所示。

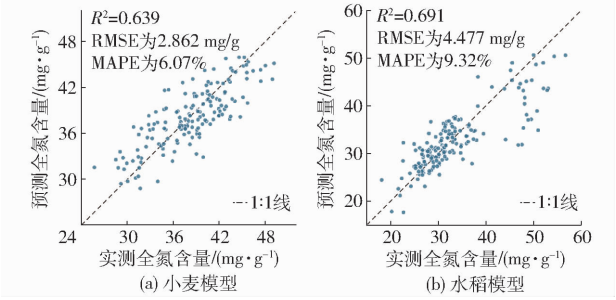


图 21 小麦与水稻全氮含量模型预测结果

Fig. 21 Model prediction results of total nitrogen content in wheat and rice

小麦全氮含量模型的 R^2 为 0.639，RMSE 为 2.862 mg/g，MAPE 为 6.07%；水稻全氮含量模型的 R^2 为 0.691，RMSE 为 4.477 mg/g，MAPE 为 9.32%。两种全氮含量模型的 MAPE 均低于 10%，能够在一定程度上反映叶片全氮含量的变化。

4 结论

(1)设计了一种面向田间叶片检测的手持式多波长作物养分检测仪。仪器采用 450、545、590、645、750、800、1 050 nm 7 个波长进行主动反射测量，采用环形发射、中心接收的光路结构，并配置可更换的大、小孔径探头。能够完成反射信号采集、养分含量计算、结果显示、定位及数据上传，满足田间单手持握和快速测量需求。

(2)构建了由 8 kHz 光源调制、同步采样和双相数字锁相处理组成的信号提取方法，并建立了一种稳定的反射率解算方法。双相数字锁相处理可抑制环境光直流分量和随机噪声，二次非线性标定用于描述仪器响应幅值与反射率之间的关系，参比更新则用于修正开机升温和器件状态变化引起的响应漂移。

(3)性能试验表明，仪器具有较好的测量准确性、重复性和台间一致性。50% 和 10% 标准反射板的平均绝对误差分别为 0.394 8、0.117 9 个百分点；不同孔径探头的测量结果稳定且接近真值；真实叶片台间对比中，7 个波长的相关系数为 0.946 ~ 0.993，RMSE 为 0.152 ~ 1.630 个百分点，说明仪器在更换探头和不同仪器条件下均能保持较一致的反射率输出。

(4)以 7 个波长反射率和 7 个植被指数构成 14

维候选特征，通过特征筛选和 5 折交叉验证，分别建立了小麦、水稻叶绿素含量和叶片全氮含量检测模型。小麦、水稻叶绿素模型的 R^2 分别为 0.821 和 0.859，RMSE 分别为 3.046 和 2.506，MAPE 分别为 5.66% 和 4.95%；小麦、水稻全氮含量模型的 R^2 分别为 0.639 和 0.691，RMSE 分别为 2.862 mg/g 和 4.477 mg/g，MAPE 分别为 6.07% 和 9.32%。结果表明，仪器获取的多波长反射率及其组合特征能够较好地估算小麦、水稻叶绿素含量，并对叶片全氮含量具有一定预测能力。

参 考 文 献

[1] Ravier C, Quemada M, Jeuffroy M H. Use of a chlorophyll meter to assess nitrogen nutrition index during the growth cycle in winter wheat[J]. Field Crops Research, 2017, 214: 73 - 82.

[2] Mu X, Chen Y. The physiological response of photosynthesis to nitrogen deficiency[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 158: 76 - 82.

[3] Lichtenthaler H K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes[J]. Methods in Enzymology, 1987, 148: 350 - 382.

[4] Simonne E H, Mills H A, Jones J B, et al. A comparison of analytical methods for nitrogen analysis in plant tissues[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1994, 25(7 - 8): 943 - 954.

[5] Wang Y X, An J W, Shao M C, et al. A comprehensive review of proximal spectral sensing devices and diagnostic equipment for field crop growth monitoring[J]. Precision Agriculture, 2025, 26: 54.

[6] Pancorbo J L, Camino C, Alonso-Ayuso M, et al. Simultaneous assessment of nitrogen and water status in winter wheat using hyperspectral and thermal sensors[J]. European Journal of Agronomy, 2021, 127: 126287.

[7] Dai J, Jamalinia E, Vaughn N R, et al. A general methodology for the quantification of crop canopy nitrogen across diverse species using airborne imaging spectroscopy[J]. Remote Sensing of Environment, 2023, 298: 113836.

[8] 剧伟良，杨玮，宋亚美，等. 基于微型光谱仪和 Transformer 模型的便携式土壤全氮含量检测仪研究[J]. 农业机械学报，2025，56(6)：268 - 276.
Ju Weiliang, Yang Wei, Song Yamei, et al. Research on portable soil total nitrogen content detector based on miniaturized spectrometer and Transformer model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 268 - 276. (in Chinese)

[9] 张春琪，刘梦舒，晁锦阳，等. 基于特征波长的接触式作物叶绿素检测系统[J]. 农业机械学报，2024，55(增刊 2)：255 - 262.
Zhang Chunqi, Liu Mengshu, Chao Jinyang, et al. Contact crop chlorophyll detection system based on characteristic wavelengths[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S2): 255 - 262. (in Chinese)

[10] Ding Y, Wu X, Yu H, et al. A new method for measuring vegetation indices based on passive light source[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 187: 106238.

[11] Padilla F M, Gallardo M, Peña-Fleitas M T, et al. Proximal optical sensors for nitrogen management of vegetable crops: a review[J]. Sensors, 2018, 18(7): 2083.

[12] Liu N, Zhang W, Liu F, et al. Development of a crop spectral reflectance sensor[J]. Agronomy, 2022, 12(9): 2139.

[13] Conley M M, Thompson A L, Hejl R. Proximal active optical sensing operational improvement for research using the CropCircle ACS - 470: implications for measurement of normalized difference vegetation index (NDVI)[J]. Sensors, 2023, 23(11): 5044.

[14] Jiang J, Wang C, Wang H, et al. Evaluation of three portable optical sensors for non-destructive diagnosis of nitrogen status in winter wheat[J]. Sensors, 2021, 21(16): 5579.

[15] 孙红，邢子政，张智勇，等. 基于 RED - NIR 的主动光源叶绿素含量检测装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2019，50(增刊)：175 - 181.
Sun Hong, Xing Zizheng, Zhang Zhiyong, et al. Design and experiment of chlorophyll content detection device for active light source based on RED - NIR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(S): 175 - 181. (in Chinese)

[16] 唐伟杰，王楠，刘国辉，等. 基于光环境校正的便携作物叶绿素检测仪设计[J]. 农业机械学报，2022，53(增刊 1)：249 - 256.
Tang Weijie, Wang Nan, Liu Guohui, et al. Design of portable crop chlorophyll detector with ambient light correction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1): 249 - 256. (in Chinese)

[17] Ni J, Zhang J, Wu R, et al. Development of an apparatus for crop-growth monitoring and diagnosis[J]. Sensors, 2018, 18(9): 3129.

[18] Song D, Qiao L, Gao D, et al. Development of crop chlorophyll detector based on a type of interference filter optical sensor [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 187: 106260.

(下转第 214 页)

Yang Li, Shi Song, Cui Tao, et al. Air-suction corn precision metering device with a mechanical supporting plate to assist carrying seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(S1): 341 – 347. (in Chinese)
[13] 颜丙新,张东兴,杨丽,等. 重力辅助充种盘室同步气吸式排种器性能分析[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊 1):117 – 124.
Yan Bingxin, Zhang Dongxing, Yang Li, et al. Performance analysis of gravity assist filling precision seed-metering device with synchronously rotating seed plate and vacuum chamber[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(S1): 117 – 124. (in Chinese)
[14] Wang Y, Zhang W, Luo X, et al. Effect of vibration conditions on the seed suction performance of an air-suction precision seeder for small seeds[J]. Agriculture, 2024, 14(4): 559.
[15] 陈进,周韩,赵湛,等. 基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究[J]. 农业机械学报,2011,42(10):79 – 83,100.
Chen Jin, Zhou Han, Zhao Zhan, et al. Analysis of rice seeds motion on vibrating plate using EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 79 – 83, 100. (in Chinese)
[16] 邵伟. 穴盘式大葱育苗机精量播种装置的设计与试验[D]. 泰安:山东农业大学, 2020.
Shao Wei. Design and experiment of precision seeding device for plug-type onion seeding planter[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
[17] Feng D, Li H, Qi X, et al. Design and laboratory experiments of a pneumatic disc-type garlic precision seed-metering device [J]. Journal of the ASABE, 2024, 67(2): 451 – 460.
[18] 李骅,孟煜柏,齐新丹,等. 基于 Bonding V2 模型的蒜种离散元建模与参数标定[J]. 农业机械学报,2025,56(7):150 – 157.
Li Hua, Meng Yubai, Qi Xindan, et al. Discrete element modelling method and parameter calibration of garlic species based on Bonding V2 model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 150 – 157. (in Chinese)
[19] 刘海,廖宜涛,王磊,等. 小白菜正负气压组合式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 54 – 65.
Liu Hai, Liao Yitao, Wang Lei, et al. Design and experiment of positive and negative pressure combination precision metering device for pakchoi[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 54 – 65. (in Chinese)
[20] 廖宜涛,张百祥,郑娟,等. 气力针式行星轮系窄行密植精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(11):86 – 99.
Liao Yitao, Zhang Baixiang, Zheng Juan, et al. Design and experiment of pneumatic needle planetary gear narrow-row close planting precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 86 – 99. (in Chinese)
[21] Hsieh J. Design and analysis of cams with three circular-arc profiles[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(6): 955 – 965.

(上接第 121 页)

[19] 盛文溢, 吴凡, 胡轩, 等. 基于主动光源的手持式作物 NDVI 传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 301 – 310.
Sheng Wenyi, Wu Fan, Hu Xuan, et al. Design and experiment of handheld crop NDVI sensor based on active light source [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 301 – 310. (in Chinese)
[20] Scofield J H. Frequency-domain description of a lock-in amplifier[J]. American Journal of Physics, 1994, 62(2): 129 – 133.
[21] Restelli A, Abbiati R, Geraci A. Digital field programmable gate array-based lock-in amplifier for high-performance photon counting applications[J]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(9): 093112.
[22] Galaviz-Aguilar J A, Vargas-Rosales C, Falcone F, et al. Field-programmable gate array (FPGA)-based lock-in amplifier system with signal enhancement: a comprehensive review on the design for advanced measurement applications[J]. Sensors, 2025, 25(2): 584.
[23] Harvie A J, de Mello J C. OLIA: an open-source digital lock-in amplifier[J]. Frontiers in Sensors, 2023, 4: 1102176.
[24] Kipp S, Mistele B, Schmidhalter U. The performance of active spectral reflectance sensors as influenced by measuring distance, device temperature and light intensity[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 100: 24 – 33.
[25] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. Remote Sensing of Environment, 1979, 8(2): 127 – 150.
[26] Gitelson A A, Kaufman Y J, Merzlyak M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS – MODIS [J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(3): 289 – 298.
[27] Gitelson A A, Merzlyak M N. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(12): 2691 – 2697.
[28] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1 – 2): 195 – 213.
[29] Hunt E R J, Cavigelli M, Daughtry C S T, et al. Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status[J]. Precision Agriculture, 2005, 6(4): 359 – 378.
[30] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(1): 76 – 87.
[31] Gao B C. NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(3): 257 – 266.