

机载非接触式近红外土壤墒情检测系统研制

朱文静^{1,2}, 冯展康^{1,2}, 吴抒航^{1,2}, 梅红镇³, 崔冰波^{1,2}, 魏新华^{1,2*}, 骆骏良¹

(1. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013;
3. 镇江市京口精以机电研发中心, 镇江 212013)

摘要: 针对探针式土壤水分传感器插入土壤后因反馈点固定而需大量布点、成本高、破坏耕层等问题, 该研究提出一种基于法布里-珀罗干涉近红外传感器的非接触式土壤墒情在线检测系统。系统硬件部分由机载自动检测装置、电气控制箱和北斗双天线实时差分定位系统 (Real Time Kinematic, RTK) 组成。整套系统样机的试制包括: 传感器的选型和模块设计封装、升降检测装置设计、传感器避障与采样点北斗定位、土壤含水量预测建模、软件中的二次开发和系统与润禾 2ZBA-2 型移栽机的集成等。田间试验结果表明: 当移栽机以 0.3 m/s 速度行进时, 土壤水分传感器参比校准后进行土壤水分的测定, 5 s 内工控机上实时显示水分含量值, 水分含量预测值与实测值的相对误差范围为 0.18%~14.46%, 平均相对误差 7.77%, 所测水分值结合北斗 RTK 系统测得的定位坐标生成土壤表层含水率分布图, 为后续喷灌、滴灌等变量灌溉提供参考依据。

关键词: 近红外; 无损检测; 土壤含水量; 智能农业装备

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.09.008

中图分类号: TP23; S237

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-09-0073-08

朱文静, 冯展康, 吴抒航, 等. 机载非接触式近红外土壤墒情检测系统研制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 73-80.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.09.008 <http://www.tcsae.org>

Zhu Wenjing, Feng Zhankang, Wu Shuhang, et al. Development of an airborne non-contact near-infrared soil moisture detection system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(9): 73-80. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.09.008 <http://www.tcsae.org>

0 引言

智慧灌溉是未来农业的发展方向, 而智慧灌溉必须依托土壤墒情的智能感知、用水智能决策与智能控制。土壤含水量是影响土壤质量的重要指标^[1], 在农业生产和田间管理过程中发挥着重要作用, 对农田墒情的评判也至关重要^[2]。目前土壤含水量的测量方法有烘干法、中子法、土壤电阻率法、时域法、频域法和遥感法等^[3-7]。在土壤水分实时检测领域最常用的传感器是探针式水分传感器^[8-9], 即在土壤中插入或者深埋检测装置和电极探针, 此类接触式的传感器通常还包括地上部分用于供电和信号传导, 成本较高, 如果大田密集布点不仅成本增加且破坏耕层土壤, 矗立在田对后期农机的作业也不利。

土壤含水量影响波段反射光谱, 其中最敏感的波段为近红外波段^[10], 又因近红外光谱法 (Near Infrared Spectrum, NIRS) 具有测量速度快、自动化程度高、无需对土壤样本进行预处理等优点^[11], 在土壤水分测量方面的潜力已得到国内外学者的广泛认可^[12-14]。微小型近

红外传感器在水分检测方面的应用也成为研究的热点。Kano 等^[15]设计了一种小型轻便的近红外光谱仪器, 可在野外进行水分测量, 但测量结果易受土壤类型和土壤质地的影响; 杨柳等^[16]基于近红外反射原理设计了一款小型土壤含水率测量仪, 预测效果良好, 但集成度不够无法实现自动测量; 张东兴等^[17]基于高分辨率光谱仪采集不同水分梯度的土壤光谱数据, 设计出了一种应用于实验室的可见光-近红外式土壤水分传感器。以上学者的研究对近红外光传感器的推广和应用具有重要意义, 但目前大多数的近红外光谱仪器制造成本较高、局限于实验室且缺少与现有农机设备相结合的产品, 无法真正服务于智能农机或无人农机。

本研究从实现土壤墒情快速检测的实际需求出发, 设计一种机载近红外土壤墒情检测系统, 通过悬挂搭载于自走式全自动移栽机等农机装备, 实现在行进过程中对田间土壤水分含量的自动检测并生成土壤含水量分布图, 为变量灌溉与装备的发展提供参考。

1 机载自动检测装置整体设计

机载自动检测装置包括近红外土壤水分传感器和升降检测机构两部分。土壤水分传感器用于检测土壤含水量信息, 升降检测机构用于保护土壤水分传感器并控制其到达土壤表面进行检测。

1.1 传感器

本研究选用光谱范围 1 750~2 150 nm 的基于法布里-珀罗干涉的微型近红外传感器 (NIRONE2.5, 芬兰)^[18]。

收稿日期: 2022-01-07 修订日期: 2022-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61901194), 江苏省农业科技自主创新资金项目 (CX(21)3061), 国家自然科学基金项目 (32071905), 江苏省优势学科项目 (PAPD-2018-87), 江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目 (202110299325H)

作者简介: 朱文静, 博士, 副研究员, 研究方向为智慧农业信息感知技术与仪器设备。Email: zwj0410@foxmail.com

*通信作者: 魏新华, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为农业装备作业状态信息实时检测技术及系统。Email: wei_xh@126.com

该传感器(图1)体积小、便于与农机集成和进行二次开发。传感器的外型尺寸为 $25\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 17.5\text{ mm}$, 重约 15 g , 波长分辨率为 $15\sim 25\text{ nm}$, 波长温度响应最大为 $0.1\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, 信噪比 $>10\ 000$, 拥有USB与蓝牙2.0两种通讯方式, 主要由探测器、动作器和微能源组成。

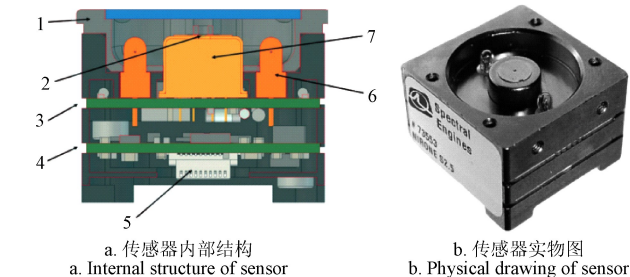


图1 传感器示意图
Fig.1 Schematic diagram of sensor

对传感器进行模块化封装, 封装结构切面如图2, 传感器封装后的外型尺寸为 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 30\text{ mm}$, 重约 300 g 。在传感器外壳上方设有外接圆直径为 35 mm 的正方形开口, 用于放置高透光玻璃镜片, 该镜片既可防止传感器内部通光孔直接接触土壤, 又可以让土壤的反射光透过镜片进入到传感器内部。传感器侧面设有键槽开口用于连接USB插头, 键槽开口内部有 5° 倾角的方形空腔贯通^[9], 主要作用是: 当照射到玻璃盖板上的入射光线和干涉仪的共振频率相同时, 卤素灯光会在探孔下方玻璃镜片上产生反射, 镜片反射光在一定程度上会影响光谱数据的结果。倾角可最大限度地探测到土壤漫反射回来的光线, 提高光谱探测信号质量。封装不仅可延长传感器使用寿命, 更便于与农机部件集成。

当传感器在最佳检测距离($0\sim 30\text{ mm}$)内, 卤素灯短暂亮起, 光线经土壤表面漫反射后透过玻璃盖板进入到传感器外壳内腔, 穿过传感器的通光孔进入到传感器内部, 传感器内部涂有高反射率涂层, 光线在涂层间多次来回反射, 形成多束平行的反射光和透射光, 传感器检测到光强信号后, A/D模块将光强信号处理成相应的电信号, 最后经数据线传输至工控机终端软件进行处理, 得到各波段光谱点数据并生成光谱曲线, 光谱曲线与土壤含水量实测值进行化学计量学建模, 在模型与原芯片软件二次开发和集成调用基础上, 对未知土壤样本的水分进行检测。

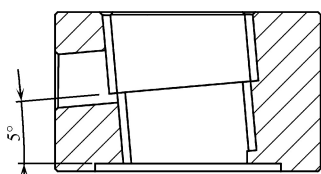


图2 传感器封装结构切面图
Fig.2 Sectional view of sensor packaging structure

1.2 升降检测机构

升降检测机构结构和实物图如图3所示。

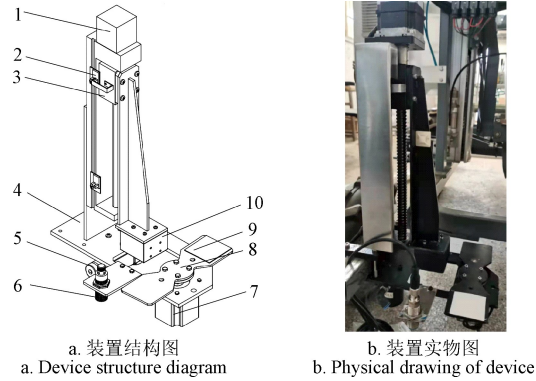


图3 升降检测机构示意图
Fig.3 Schematic diagram of lifting detection mechanism

整体采用悬挂式设计, 可方便固定于移栽机上, 亦便于与其他农机集成, 传感器开始工作时, 将其送至土壤表面测量表层土壤水分, 测量结束后升起, 将其送至安全位置。升降检测机构整体外形尺寸为 $270\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 480\text{ mm}$, 重约 5 kg 。升降控制采用适合垂直高速往返传动的丝杠模组, 该模组能对方前高低落差做出快速反应, 精确控制土壤水分传感器与土壤的距离。丝杠模组长约 300 mm , 量程由上下限位开关控制, 通过调节限位开关, 调节量程, 安装高度约 260 mm , 最大量程为 260 mm 。

工作时, 首先进行近红外土壤水分传感器的自动参比校准, 由开环步进电机7带动旋转平台8将参比板9在水平面内逆时针旋转 90° , 近红外土壤水分传感器10下行至参比板9上方进行标定, 标定结束旋转平台8复位至初始位置, 由超声波传感器6对行进方向土壤高度进行扫描测距, 根据测距值大小, 闭环步进电机1驱动丝杠升降模组3携带土壤水分传感器10下行至土壤表面进行吸光度扫描, 扫描结束后吹气电磁阀5吹除传感器镜面灰尘, 丝杠升降模组3回升到上限位开关2位置结束工作, 等下一次指令。升降检测机构的工作流程如图4所示。

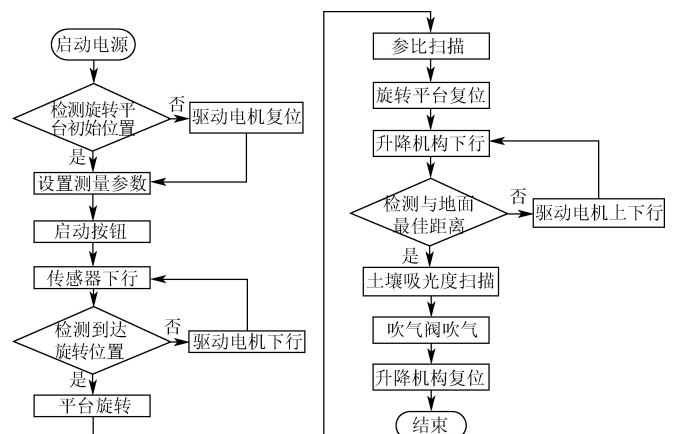
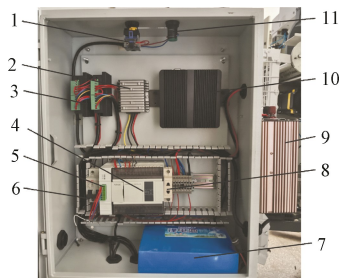


图4 升降检测机构工作流程图
Fig.4 Work flow chart of lifting detection mechanism

2 控制系统和定位系统

2.1 电气控制箱

考虑到控制模块移动的便携性和安全性, 将工控机、控制线路、PLC 等元器件安装在一个电气箱中, 如图 5 所示。



1.按钮 2.变压器 3.电机驱动器 4.信捷 PLC 5.模拟量模块 6.电源开关
7.锂电池 8.插头 9.逆变器 10.工控机 11.指示灯
1.Button 2.Transformer 3.Motor driver 4.Xinjie PLC 5.Analog module
6.Power switch 7.Lithium battery 8.Plug 9.Transformer 10.Industrial computer 11.Indicator light

图 5 电气箱组成结构图

Fig.5 Composition structure diagram of electrical box

本系统选用 PLC 作为控制部件, 并添加模拟量模块 5 将距离信号转化为电压信号, 选用搭载触摸显示屏的工控机 10 作为人机交互的载体。电源动力由 36V-20A.H 锂电池 7 提供, PLC 控制系统工作电压 36 V, 工作电流为直流电, 电机驱动器 3 控制步进电机为升降检测机构提供动力, 两者都由锂电池 7 直接供电。工控机 10 工作电压 240 V, 工作电流为交流电, 工作时逆变器 9 先将直流电转化为交流电, 再由变压器 2 将 36 V 电压转化为 240 V 工作电压。电气箱底部设有接口箱子顶部设有按钮开关和信号灯。

PLC 控制系统选用 Xinje-XD 系列, 具有较强的逻辑处理和数据运算能力, 并具有 A/D、D/A 转换功能, 可添加模拟量模块, 满足装置的控制需求。通过 PLC 编程实现以下功能:

- 1) 将检测的距离信号转化为电压信号, 并控制升降检测机构运行和自动参比较准。
- 2) 自动控制启用土壤水分传感器, 并上传土壤水分检测值至工控机内光谱采集软件。
- 3) 控制吹气电磁阀对土壤水分传感器镜面进行气吹, 吹除传感器镜面灰尘。

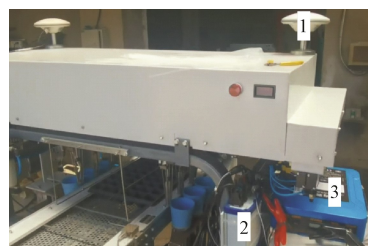
控制系统由若干个控制回路构成, 整个电气控制箱仅有一个按钮, 只需一键操作就可以控制整个装置依次完成标定、检测过程。

2.2 定位系统

为准确获取土壤含水量采样点的经纬度信息, 本系统加装北斗双天线实时差分 (Real Time Kinematic, RTK) 定位系统 (图 6)。定位天线 1 直径 150 mm, 高 63.7 mm, 两天线相距 1.8 m, 磁吸于移栽机顶部。接收器 2 外形尺寸 140 mm×120 mm×70 mm, 安装于移栽机机架上, 工作电压 12 V, 由 12 V-20 A.H 锂电池 3 直接供电。

受限于定位天线的安装以及移栽机的机械结构, 主

定位天线与自动检测装置的安装位置不重合, 需对其进行杆臂校正, 最后通过测量自动检测装置在相对坐标系中的坐标值, 写入定位系统中, 并集成开发嵌入式软件于工控机中, 实现土壤墒情在线检测装置的精准定位。



1.定位天线 2.接收器 3.锂电池
1. Positioning antenna 2.Receiver 3.Lithium battery

图 6 北斗 RTK 系统安装示意图

Fig.6 Installation diagram of Beidou Real Time Kinematic (RTK) system

在农田检测作业时, 田块往往不是理想的平整田块, 存在一定的起伏变化, 为保证检测结果的有效性, 保障土壤水分传感器的安全, 选用 LGUB1000 超声波测距传感器完成检测过程中的测距。该传感器有效检测距离为 3~50 mm, 安装使用方便, 制造成本低, 可检测行进方向的土壤起伏变化^[20]。检测过程中, 超声波测距传感器将测得的距离信号传递给模拟量模块, 模拟量模块将距离信号转化为电压信号后传递给 PLC 进行处理, 闭环步进电机再根据 PLC 反馈信号的变化, 实时调整土壤水分传感器的高度。

3 表层土壤水分模型构建

3.1 土壤样本

本研究选取国内常见的黄褐土 (江苏镇江)、黑土 (云南文山)、红土 (辽宁朝阳)、砂土 (陕西安康) 作为建模数据。每种土壤分别采集土样 250 份, 共计 1 000 份样本。过 40 目筛 (孔径 0.425 mm) 后去除土壤中植物根系等杂质, 将样本依次装入有编号的矩形盛样皿中用于后续土样光谱数据的采集。

3.2 光谱数据采集与预处理

将土壤水分传感器放置在土壤样品表面, 首先进行“暗电流扫描”, 后用参比板进行参比较正, 最后将土壤水分传感器放到土壤样品表面进行吸光度扫描, 获取 1 750~2 150 nm 波段范围近红外光谱点数据。

光谱数据采集完成后, 导出检测软件中各土壤样本光谱数据, 得到各类土壤的原始光谱曲线, 以黑土为例 (图 7a)。为减少原始光谱曲线中噪声干扰引起的光谱误差, 采用标准正态变量变换 (Standard Normal Variable, SNV) 和多元散射校正 (Multivariate Scattering Correction, MSC) 对原始光谱进行预处理, 采用五点滑动平均滤波 (Moving Average Filtering, MAF) 和五点卷积平滑 (Savitzky-Golay, SG)^[21]对原始光谱曲线进行平滑处理, 经过 SNV+五点 SG 平滑预和 100 倍放大处理后, 得到预处理后的光谱曲线 (图 7b)。预处理后的光谱曲线平滑过渡更好, 吸收峰更加明显, 波峰在 1 940 nm 波段左右,

与已有学者的结论^[22-23]一致, 传感器性能可靠, 可为预测模型精度提供保障。

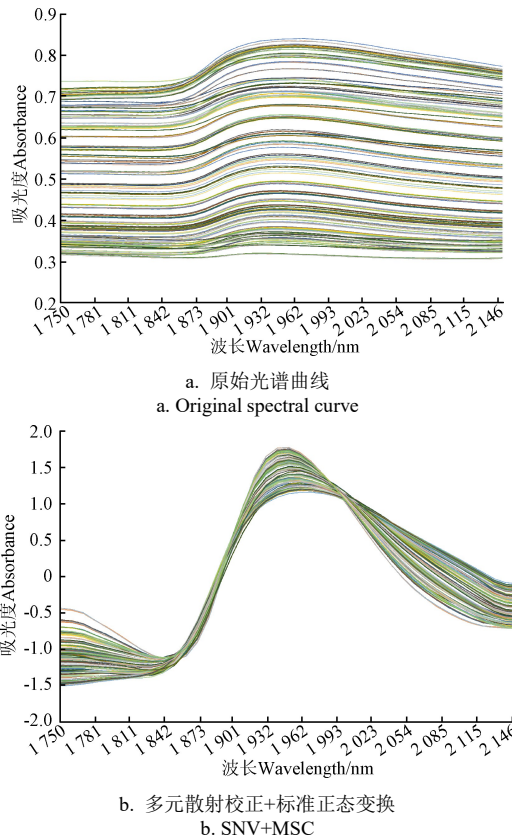


图7 云南黑土土壤样本光谱曲线

Fig.7 Spectral curve of black soil sample in Yunnan

3.3 土壤光谱数据的获取

测定土样的光谱数据后, 使用烘干法 (NYT52-1987) 获得土样实际含水率, 依次将土样放入干净烧杯中, 标号、称量后放入 105 °C 烘烤箱中, 恒温烘烤 12 h 去除水分。

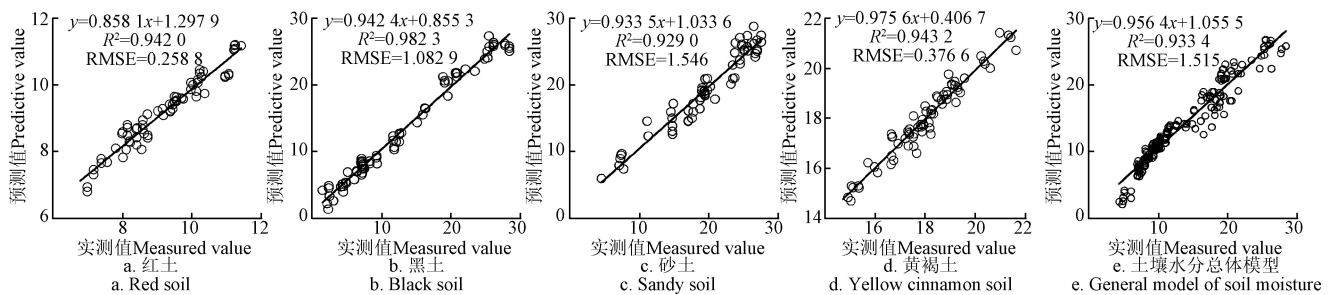


图8 水分预测模型

Fig.8 Soil moisture model

3.5 土壤水分采集模块软件二次开发

基于试验获取的土壤含水量预测模型, 借助 Visual Studio 2021 IDE 软件开发工具^[27-28], 应用 Python 算法库进行对原有近红外传感芯片采集软件的二次开发。二次开发后的软件拥有土壤样品自动扫描、参比光谱自动对照、土壤含水量实时预测等功能。

软件系统包括系统设置模块、参比扫描模块、吸光度扫描模块、保存和调入参比光谱模块。系统设置模块可设置卤素光源强度、扫描次数、扫描间隔、仪器传输

烘烤结束后冷却称量, 根据公式 (1) 计算出各土壤样品的实际含水率。

$$\text{含水率 (分析基)} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中 m_0 为干净空烧杯的质量, g ; m_1 为烘干前烧杯及土样质量, g ; m_2 为烘干后烧杯及土样质量, g 。

3.4 预测模型的建立与验证

将土壤实际含水量与预处理后的近红外光谱数据作为建模参量, 采用偏最小二乘法 (Partial Least Squares Regression, PLSR)^[24]进行模型构建。采用 SPXY (Set Partitioning based on joint X-Y distance) 采样法^[25]对土壤样本进行划分, 每种土壤 250 个样本的 70% 作为校正集, 30% 作为预测集。确定数据的主成分数后, 依据聚类分析结果, 剔除一些明显偏离曲线位置的数据样本, 以提高校正集样本的质量, 降低对后续数据处理的不利影响, 提高模型的准确性。依据模型的判定系数 (Coefficient of Determination, R^2)、均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 判别模型质量, R^2 越大, RMSE 越小, 说明模型的准确性越好^[26]。各类土壤表层土壤水分预测模型如图 8 所示。

由图 8 可知, 各类土壤预测模型的 R^2 均在 0.9 以上, RMSE 均在 2 以下。其中黑土因质地细腻, 预测模型的 R^2 最高, 达到 0.982 3, 砂土质地粗糙、颗粒大, 预测模型的 R^2 最低, 但也达到 0.929。这是由于砂土在土壤低含水率时, 水分吸收峰不明显, 剔除砂土低含水率光谱数据导致砂土预测模型的 R^2 降低。为提高预测模型的普适性, 整合全部土壤光谱数据进行 PLSR 建模得到土壤水分总体模型 (图 8e), 土壤总体模型曲线拟合度较高, R^2 达到 0.933 4, 较单一土壤预测模型 R^2 略有降低, 但总体模型的普适性好, 适合大多数土壤含水量的预测。

波特率等; 参比扫描模块可调入各类土壤水分预测模型; 保存和调入参比模块可调入或保存参比板反射率, 可省略每次检测参比扫描的步骤, 提高检测效率; 吸光度扫描为本软件的主要工作模块。

土壤水分传感器连接成功后, 主界面左下角绿灯亮起。设置传感器相应参数, 调入预测模型后, 点击“吸光度扫描”, 土壤水分传感器开始工作, 自动检测采样点的表层土壤水分, 5 s 内主界面显示该点的光谱曲线和表层土壤水分含量, 如图 9 所示, 并对检测结果进行自动编号、保存。

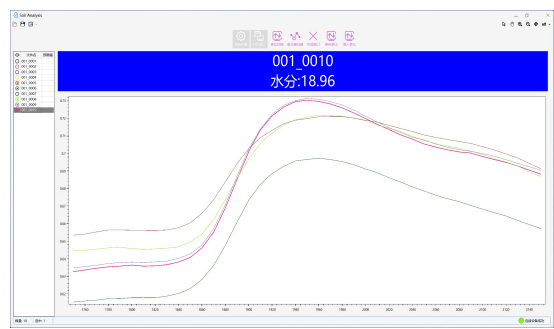


图 9 软件主界面
Fig.9 Software main interface

4 田间试验

4.1 试验地点与方法

为测试土壤水分传感器的检测性能和升降检测机构的设计是否满足田间作业要求，将近红外土壤墒情检测系统集成到润禾 2ZBA-2 型移栽机上（如图 10b）进行田间试验。

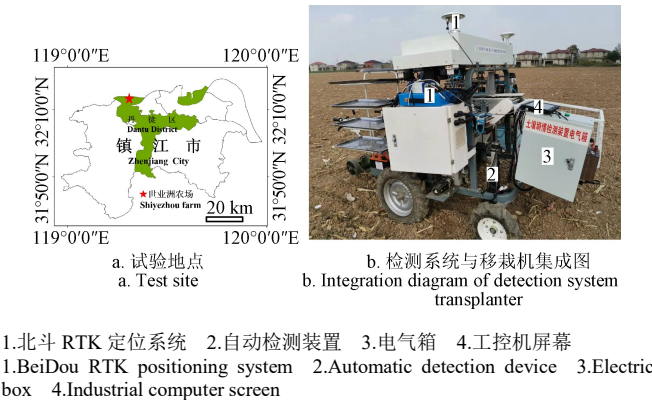


图 10 试验地点及检测系统与移栽机集成图
Fig.10 Test site and integration diagram of detection system and transplanter

土壤墒情检测田间试验于 2021 年 11 月 3 日在江苏镇江丹徒区世业洲农场基地中进行（如图 10a）。试验田土壤类型为黄褐土，面积约为 200 m²，选取其中 3 条较

为平整的土垄作为测试区域，土垄高度差约为 120 mm。试验开始前将自动检测装置安装在移栽机右下方底盘机架架上，传感器距离水平地面高度为 225 mm，电气箱悬挂于移栽篮上，导入黄褐土预测模型，设置传感器连续扫描的次数和扫描间隔。为了测试传感器在同一点的测量精度，移栽机以 0.3 m/s 的速度行进下，每隔 18 s 停机，升降检测装置下行至土壤表面，土壤水分传感器连续测量 3 次同一位置的表层土壤水分含量。

4.2 试验结果与分析

将北斗 RTK 定位系统与土壤水分自动检测装置设置相同的采样间隔，获取同一采样点表层土壤水分信息与定位信息并标记采样点位置。土壤水分检测软件读取北斗定位系统的经纬度坐标信息并与土壤含水量信息实现配对、整合，再结合试验测得采样点实际含水量。

同一采样点测试 3 次，测量结束后利用 3.3 节方法对各采样点进行依次取样、预处理、烘干和计算得到该测试点土壤含水量实测值。采用 SPSS26.0 统计分析软件进行单因素方差分析，试验结果以平均值±标准差的形式表示，利用公式（2）计算土壤含水量预测值与实测值的相对误差（ δ ，%）。

$$\delta=\frac{\Delta}{L}\times100\% \tag{2}$$

式中 Δ 为传感器预测值均值与理化测定得出的实测值之间的差值的绝对值， L 为实测值。

由表 1 可知：移栽机以 0.3 m/s 速度工作时，土壤水分传感器能有效测量到地表土壤的水分含量。其中 12、23 号测量点数据出现负数，原因可能是土壤水分传感器在检测时，土壤中存在石块等杂物，使得传感器并未检测到土壤；17 号测量点数据为小数，原因可能是该测量位置出现起伏较大的凹坑，升降机构的丝杆到达最大量程，没有到达最佳扫描距离所致。经计算，除 3 点异常数据外，土壤含水量预测值与实测值基本一致，相对误差的范围为 0.18%~14.46%，平均相对误差为 7.77%，小于 10%，说明本系统传感器与预测模型配合能较为准确的检测农田土壤表层含水率。

表 1 传感器田间试验误差分析
Table 1 Error analysis of sensor in field test

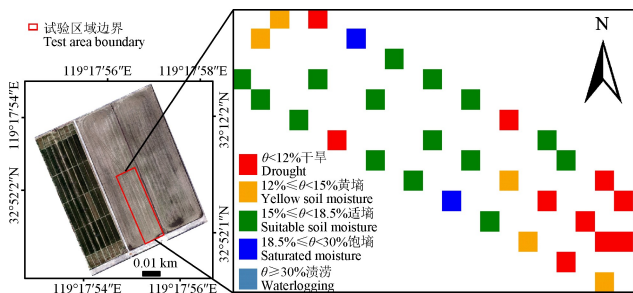
| 采样点 Sampling point | 经纬度 Position in formation/(°) | 土壤含水率 Soil moisture content/% | | 相对误差 Relative error/% | | 采样点 Sampling point | 经纬度 Position in formation/(°) | 土壤含水率 Soil moisture content/% | | 相对误差 Relative error/% |
|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------------|--|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| | | 预测值 Predictive value | 实测值 Measured value | | | | | 预测值 Predictive value | 实测值 Measured value | |
| | | | | | | | | | | |
| 1 | 32.202 63, 119.293 24 | 16.43±0.30 | 17.36 | 5.36 | | 17 | 32.205 63, 119.297 57 | 0.7 | / | |
| 2 | 32.205 57, 119.297 56 | 15.19±0.31 | 16.75 | 9.33 | | 18 | 32.205 60, 119.297 58 | 12.66±0.20 | 14.23 | 11.03 |
| 3 | 32.205 61, 119.297 54 | 15.59±0.06 | 16.57 | 5.89 | | 19 | 32.205 57, 119.297 60 | 13.94±0.40 | 15.13 | 10.20 |
| 4 | 32.205 65, 119.297 52 | 11.9±0.23 | 13.32 | 14.46 | | 20 | 32.205 55, 119.297 61 | 16.64±0.10 | 17.81 | 11.03 |
| 5 | 32.205 67, 119.297 50 | 10.68±0.15 | 12.14 | 11.97 | | 21 | 32.205 52, 119.297 59 | 17.47±0.12 | 17.63 | 10.20 |
| 6 | 32.205 70, 119.297 48 | 9.56±0.23 | 11.08 | 13.72 | | 22 | 32.205 52, 119.297 56 | 16.75±0.20 | 16.96 | 6.57 |
| 7 | 32.205 73, 119.297 46 | 7.55±0.15 | 8.83 | 14.45 | | 23 | 32.205 53, 119.297 53 | -253.7 | / | |
| 8 | 32.205 75, 119.297 45 | 10.44±0.21 | 11.52 | 9.35 | | 24 | 32.205 56, 119.297 52 | 16.59±0.31 | 17.45 | 4.91 |
| 9 | 32.205 78, 119.297 43 | 11.39±0.15 | 13.32 | 7.52 | | 25 | 32.205 59, 119.297 51 | 17.15±0.40 | 17.12 | 0.18 |
| 10 | 32.205 78, 119.297 44 | 17.53±0.10 | 17.95 | 2.34 | | 26 | 32.205 61, 119.297 50 | 21.90±0.40 | 19.53 | 12.11 |
| 11 | 32.205 78, 119.297 47 | 16.64±0.12 | 17.62 | 5.52 | | 27 | 32.205 64, 119.297 48 | 15.35±0.17 | 16.33 | 6.00 |
| 12 | 32.205 75, 119.297 49 | -121.24 | / | | | 28 | 32.205 67, 119.297 47 | 12.35±0.17 | 13.58 | 9.06 |
| 13 | 32.205 72, 119.297 50 | 16.47±0.25 | 17.54 | 6.08 | | 29 | 32.205 69, 119.297 45 | 9.94±0.50 | 11.54 | 13.84 |
| 14 | 32.205 70, 119.297 52 | 17.65±0.23 | 17.62 | 0.15 | | 30 | 32.205 72, 119.297 44 | 13.41±0.06 | 15.21 | 11.86 |
| 15 | 32.205 67, 119.297 54 | 16.65±0.12 | 17.52 | 4.98 | | 31 | 32.205 75, 119.297 42 | 15.81±0.20 | 16.15 | 2.11 |
| 16 | 32.205 65, 119.297 55 | 24.25±0.00 | 21.46 | 13.00 | | 32 | 32.205 77, 119.297 41 | 13.32±0.20 | 14.62 | 8.90 |

4.3 土壤含水率分布图的生成

根据农业部《全国土壤墒情监测工作方案》和水利部《土壤墒情评价指标》的土壤墒情评价指标建立土壤含水量墒情预警等级指标^[29]:

$$Y_w = \begin{cases} \text{渍涝, } \theta \geq 30\% \\ \text{饱墒, } 18.5\% \leq \theta < 30\% \\ \text{适墒, } 15\% \leq \theta < 18.5\% \\ \text{黄墒, } 12\% \leq \theta < 15\% \\ \text{干旱, } \theta < 12\% \end{cases} \quad (3)$$

式中 Y_w 为土壤含水率 $\theta(\%)$ 的预警等级, 分为渍涝、饱墒、适墒、黄墒和干旱 5 个等级。根据预警等级和土壤需水量信息表生成表层土壤含水率分布图 (如图 11), 该图将抽象的表层土壤水分信息可视化, 让人们直观了解到田间各处的表层土壤水分信息。



注: θ 为土壤含水率。
Note: θ is the soil moisture content.

图 11 表层土壤含水率分布图

Fig.11 Distribution map of surface soil moisture content

5 结 论

1) 本研究基于法布里-珀罗干涉的近红外传感器研发了一款非接触式土壤墒情在线检测系统, 该系统硬件部分由机载自动检测装置、电气控制箱和北斗双天线实时差分定位系统组成。

2) 通过传感器与升降检测机构的协调配合, 实现大田表层土壤水分的自动检测。通过采集不同含水量不同种类的土样获得 1 750~2 150 mm 范围光谱数据, 建立土壤表层含水量的偏最小二乘预测模型, 黑土预测模型的 R^2 最高, 达到了 0.982 3, 砂土预测模型的 R^2 最低, 但也达到 0.929 0, 土壤总体模型曲线拟合度较高, R^2 达到了 0.933 4, 较单一土壤预测模型 R^2 略有降低, 但总体模型的普适性好, 适合大多数土壤含水量的预测。

3) 土壤水分传感器检测精度与稳定性。试验结果显示, 传感器连续检测相对误差范围为 0.18%~14.46%, 平均相对误差 7.77%, 满足田间作业的基本要求, 传感器测得区域地块的水分信息结合北斗 RTK 系统所得定位信息得出表层土壤水分含量分布图, 直接匹配土壤墒情的预警等级, 并将抽象的表层土壤水分信息可视化, 让农户直观的了解到田块的表层土壤水分信息, 同时为后续喷灌、滴灌等变量灌溉提供参考依据。

本文对微型光谱仪应用于现代智能农机进行了初探, 实现农业机械在田间管理作业过程中对表层土壤水

分含量的自动实时精准定位检测。目前整体系统的各部分的功能已经全部实现, 后续研究可增加土壤样本的类型, 进一步改造电器控制箱, 使其更加小型化、轻量化, 改进升降检测机构使其更有效的配合近红外水分传感器的数据采集, 增强其与其他农机适配性和通用化, 北斗导航系统的集约化, 以适应集成的要求, 土壤含水量分布图与地图的匹配等。

[参 考 文 献]

- [1] 邵长亮, 吴东丽. 土壤水分测量方法适用性综述[J]. 气象科技, 2019, 47(1): 1-9.
Shao Changliang, Wu Dongli, et al. Review on applicability of soil moisture measurement methods[J]. Meteorological Science and Technology, 2019, 47(1): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刁万英. 基于可见-近红外波段反射率估算表层土壤含水量[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
Diao Wanying. Estimation of Surface Soil Water Content Based on Visible Near Infrared Reflectance[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [3] 谢鹏宇, 刘泽鑫. 土壤水分测量原理与技术方法研究[J]. 现代农业科技, 2020(23): 166-168.
Xie Pengyu, Liu Zexin. Study on principles and technical methods of soil moisture measurement[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020(23): 166-168. (in Chinese with English abstract)
- [4] Evett S R, Steiner J L. Precision of neutron scattering and capacitance type moisture gages based on field calibration[J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59: 961-968.
- [5] Persson M, Hardy S. Estimating water content from electrical conductivity measurements with short time domain reflectometry probe[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(2): 478-482.
- [6] 江朝晖, 檀春节, 支孝勤, 等. 基于频域反射法的便携式土壤水分检测仪研制[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(1): 79-82.
Jiang Zhaohui, Tan Chunjie, Zhi Xiaoqin, et al Development of portable soil moisture detector based on principle of frequency domain reflectometry[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(1): 79-82. (in Chinese with English abstract)
- [7] 庞治国, 路京选, 卢奕竹, 等. 基于遥感和地面测量的多尺度土壤水分产品验证分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(4): 271-278.
Pang Zhiguo, Lu Jingxuan, Lu Yizhu, et al. Validation analysis of multi-scale soil moisture products based on remote sensing and ground measurement[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17(4): 271-278. (in Chinese with English abstract)
- [8] 余涵, 谢德体, 骆云中, 等. 4 种常见土壤含水量传感器精度分析及评价[J]. 农业工程, 2019, 9(6): 26-32.
Yu Han, Xie Deti, Luo Yunzhong, et al. Accuracy analysis and evaluation of four common soil moisture sensors[J]. Agricultural Engineering, 2019, 9(6): 26-32. (in Chinese with English abstract)

- English abstract)
- [9] 石元. 面向土壤剖面水分检测的电容传感器及系统设计研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
Shi Yuan. Research on Capacitance Sensor and System Design for Soil Profile Moisture Detection[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [10] Muhammad A M, Said N, Abdul M M. Estimation of secondary soil properties by fusion of laboratory and on-line measured Vis-NIR spectra[J]. Remote Sensing, 2019, 11(23), <https://doi.org/10.3390/rs11232819>
- [11] 陆婉珍. 现代近红外光谱分析技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2017.
- [12] Liang H, Zhang M, Gao C, et al. Non-destructive methodology to determine modulus of elasticity in static bending of quercus mongolica using near-infrared spectroscopy[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2018, 18(6): 1-11.
- [13] Said N, Abdul M. Predictive performance of mobile vis-near infrared spectroscopy for key soil properties at different geographical scales by using spiking and data mining techniques[J]. Catena, 2017, 151: 118-129.
- [14] Kühnel A, Bogner C. In-situ prediction of soil organic carbon by VIS-NIR spectroscopy: An efficient use of limited field data[J]. European Journal of Soil Science, 2017, 68(5): 689-702.
- [15] Kano Y, McClure W F, Skaggs R. A near infrared reflectance soil moisture meter[J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(6): 1852-1855.
- [16] 杨柳, 徐榕, 雷廷武, 等. 近红外反射土壤含水率测量仪设计[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 1-9.
Yang Liu, Xu Rong, Lei Tingwu, et al. Design of near infrared reflectance soil moisture meter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31 (20): 1-9.(in Chinese with English abstract)
- [17] 张东兴, 刘江, 杨丽, 等. 基于 VIS-NIR 的播种沟内土壤水分测量传感器研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 218-226.
Zhang Dongxing, Liu Jiang, Yang Li, et al. Study on soil moisture measurement sensor in sowing ditch based on Vis-NIR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 218-226. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王彬宇, 王南朝, 刘崇, 等. 基于法布里-珀罗干涉仪的激光谱线特性测量研究[J]. 物理实验, 2019, 39(8): 1-8.
Wang Binyu, Wang Nanchao, Liu Chong, et al. Measurement of laser spectral line characteristics based on Fabry Perot interferometer[J]. Physical Experiment, 2019, 39(8): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [19] 严琪琪, 唐芳, 沈嵘, 等. 法布里-珀罗干涉仪测平板玻璃折射率的方法研究[J]. 物理实验, 2019, 39(5): 22-25, 28.
Yan Qiqi, Tang Fang, Shen Rong, et al. Study on the method of measuring the refractive index of flat glass with Fabry Perot interferometer[J]. Physical Experiment, 2019, 39(5): 22-25, 28. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王国军. 超声波测距传感器的研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2014.
Wang Guojun. Research on Ultrasonic Ranging Sensor[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [21] 刘广霖, 郭焱, 劳彩莲, 等. 基于田间原位土壤含水量估测的可见/近红外光谱建模方法[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(8): 125-131.
Liu Guanglin, Guo Yan, Lao Cailian, et al. Visible/near infrared spectroscopy modeling method based on field in-situ soil water content estimation[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(8): 125-131. (in Chinese with English abstract)
- [22] 史舟等. 土壤地面高光谱遥感原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [23] 李士通. 反射式近红外水分仪的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
Li Shitong. Research on Reflective Near Infrared Moisture Meter[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘树深. 基础化学计量学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [25] 张娟. 基于 SPXY-WT-CARS 算法的草莓糖度近红外光谱检测研究[J]. 食品与发酵科技, 2020, 56(6): 136-139, 142.
Zhang Juan. Study on near infrared spectroscopy detection of strawberry sugar degree based on SPXY-WT-CARS algorithm[J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2020, 56(6): 136-139, 142. (in Chinese with English abstract)
- [26] 于雷, 洪永胜, 耿雷. 基于偏最小二乘回归的土壤有机质含量高光谱估算[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 103-109.
Yu Lei, Hong Yongsheng, Geng Lei. Hyperspectral estimation of soil organic matter content based on partial least squares regression[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(14): 103-109. (in Chinese with English abstract)
- [27] 狄辉辉, 李京华, 刘景桑, 等. 基于 Qt/E 的嵌入式实时曲线显示界面设计与实现[J]. 电子测量技术, 2011, 34(12): 76-79.
Di Huihui, Li Jinghua, Liu jingsang, et al. Design and implementation of embedded real-time curve display interface based on Qt/E[J]. Electronic Measurement Technology, 2011, 34(12): 76-79. (in Chinese with English abstract)
- [28] 陈鲲, 陈云秋, 刘信新. 基于 Qt/Embedded 的嵌入式 Linux 应用程序的设计[J]. 计算机与数字工程, 2009, 37(1): 156-158, 161.
Chen Kun, Chen Yunqiu, Liu Xinxin. Design of embedded Linux application based on QT/Embedded[J]. Computer & Digital Engineering, 2009, 37(1): 156-158, 161. (in Chinese with English abstract)
- [29] 高明秀, 张治, 赵庚星, 等. 基于 Web GIS 的农田水肥盐碱监测与调控管理系统[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 89-99.

Gao Mingxiu, Zhang Zhi, Zhao Gengxing, et al. Monitoring, regulation and management system of farmland water, fertilizer, salt and alkali based on Web GIS[J]. Transactions

of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(17): 89-99. (in Chinese with English abstract)

Development of an airborne non-contact near-infrared soil moisture detection system

Zhu Wenjing^{1,2}, Feng Zhankang^{1,2}, Wu Shuhang^{1,2}, Mei Hongzhen³, Cui Bingbo^{1,2},
Wei Xinhua^{1,2*}, Luo Junliang¹

(1. School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. Zhenjiang Jingkou Jingyi Electromechanical Research and Development Center, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: A non-contact and online detection system was developed for the soil moisture using Fabry Perot interference near-infrared chip. A large number of points were reduced for the cost-saving and non-destruction of the cultivated layer after the probe of the soil moisture sensor was inserted into the soil. The hardware of the system consisted of an airborne automatic detection device, an electrical control box, and Beidou dual antenna real-time differential positioning. The specific sensors were then selected to detect the soil water content. The packaging of the module was designed to protect the internal structure of the sensor from damage. A lifting detection device was used to control the soil moisture sensor onto the soil surface for the detection. The obstacle avoidance of the device with the ultrasonic sensor was installed to realize the automatic positioning of the measured height. The spectral data in the range of 1 750-2 150 nm was collected from the soil samples with different water content and types. A partial least squares (PLS) prediction model was established for the water content of the soil surface. The determination coefficients of all prediction models were above 0.9. There was a high curve fitting degree of the overall soil model, where the R^2 reached 0.933 4. Although there was slightly lower than that of the single soil prediction model, there was a high universality of the overall model suitable for the prediction of most soil water content. Furthermore, the secondary development of the sensor data acquisition was realized to embed the prediction model of soil water content into the original near-infrared sensing chip system. As such, the measured value of soil water content and the corresponding spectral data curve were more intuitively displayed on the industrial computer in real time, when measuring soil samples. The measured distance information by the ultrasonic sensor was transformed into the voltage signals using the cooperated Xinjie PLC and analog module. The closed-loop stepping motor was utilized to adjust the height of the soil moisture sensor in real time, according to the PLC feedback signals, thereby realizing the coordination between the positioning system and the detection device. Correspondingly, a trial prototype was fabricated to integrate the near-infrared detection system of soil moisture and the automatic self-propelled transplanter. The field test results show that the soil moisture sensor after online calibration was dropped onto the soil surface with the lifting detection mechanism for measurement when the transplanter moved at the inspection speed of 0.3 m/s. After that, the moisture content value rose within 5 s, after the real-time display of the moisture content on the industrial computer. The measured water content of surface soil was combined with the positioning of the Beidou RTK system, thereby calculating the soil moisture content under the accurate longitude and latitude. The distribution map of soil moisture content was generated on the measured plot. Subsequently, the sampling points after the test were sampled, pretreated, dried, and calculated to obtain the actual moisture content of the sampling points, where the relative error was calculated between the measured and actual moisture content. Consequently, the measured soil moisture content in the test was basically consistent with the actual one, where the relative error of continuous detection was less than 10%. The distribution map of soil surface water content can be expected to directly match the early warning level of soil moisture for the visualization of the abstract information. Therefore, the soil moisture information of the field can be detected to accurately display in real time. The finding can provide a strong reference and practical significance for the variable irrigation, such as the sprinkler and drip irrigation, thereby optimizing the regional water and soil adaptation in the spatiotemporal pattern of water productivity. Intelligent agricultural machinery can also be created to fully realize the “border inspection and side management” of field management.

Keywords: near infrared; nondestructive testing; soil moisture; intelligent agricultural equipment