

基于电容法和深度补偿的机载式玉米播种种沟土壤墒情 在线检测系统设计与试验

张安琪 高 宁 温昌凯 杨兴华 梅鹤波 颜丙新 王 培 孟志军

(北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 针对现有玉米播种装备缺乏土壤墒情在线检测系统,且已有的土壤墒情在线检测系统检测精度不高、环境适应差的问题,本文提出了一种基于电容法和深度补偿的土壤墒情检测方法,开发了一套机载式玉米播种种沟墒情在线检测系统。开展了电容器结构优化参数仿真试验,确定了最佳电容极板参数为:极板间距 75.8 mm、极板厚度 0.7 mm、极板相对面积 5 073 mm²,其长度为 100 mm,宽度为 50.73 mm;系统硬件部分主要包括 FDC2214 型电容传感器、F4046 型压力传感器和 STM32F103 型单片机,电容传感器用于获取待测土壤电容,压力传感器用于获取待测土壤压力,间接反推待测区域土壤深度;系统软件则利用 Matlab 平台进行开发,用于对土壤电容信号和压力信号的实时采集、计算、显示与存储。基于该系统探究了土壤墒情检测模型影响因素,构建了基于 BP 神经网络的土壤墒情检测模型,建模试验结果表明,当土壤墒情为 7.23% ~ 21.14% 时,模型预测性能指标 R^2 、RMSE 和 RPD 分别为 0.927、0.008 和 3.70,预测效果较好。最终,将构建的模型集成到土壤墒情在线检测系统,开展了台架与田间验证试验。台架试验结果表明,土壤墒情实际值与检测值的拟合决定系数 R^2 均为 0.852 ~ 0.927,土壤墒情预测结果绝对误差为 -2.89% ~ 2.57%,绝对误差平均值为 1.01%;田间试验结果表明,土壤墒情检测值与实际值拟合曲线决定系数 R^2 为 0.842,土壤墒情检测绝对误差为 -0.96% ~ 0.45%,平均绝对误差为 0.39%。本研究所研制的检测系统性能满足玉米播种机田间作业时土壤墒情检测需求。

关键词: 玉米播种; 土壤墒情在线检测系统; 电容; 深度

中图分类号: S237

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)04-0087-11

OSID:



Design and Experiment of Airborne On-line Soil Moisture Detection System Based on Capacitance Method and Depth Compensation

ZHANG Anqi GAO Ning WEN Changkai YANG Xinghua MEI Hebo YAN Bingxin
WANG Pei MENG Zhijun

(Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Aiming at the lack of online soil moisture detection system for existing corn sowing equipment and the problems of low detection accuracy and poor environmental adaptation of the existing online soil moisture detection system, a method of soil moisture measurement was presented based on capacitance method and depth compensation, and a set of airborne corn sowing soil moisture online detection system was developed. In terms of electrode plate optimization, the system conducted simulation experiments on capacitor structure optimization parameters with electrode plate spacing, electrode plate thickness, and relative area as experimental factors. The optimal capacitor electrode plate parameters were determined to be as follows: electrode plate spacing of 75.8 mm, electrode plate thickness of 0.7 mm, electrode plate relative area of 5 073 mm², length of 100 mm, width of 50.73 mm. The hardware part of the system mainly included FDC2214 capacitive sensor, F4046 pressure sensor, and STM32F103 microcontroller. The capacitive sensor was used to obtain the capacitance value of the soil to be tested, and the pressure sensor was used to obtain the pressure value of the soil to be tested, indirectly inferring the soil depth in the tested area. The system software was developed by using Matlab platform for real-time acquisition,

收稿日期: 2024-12-12 修回日期: 2024-12-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1500405)、山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2022CXGC010608)和山东省重点研发计划项目(2022SFGC0202)

作者简介: 张安琪(1989—),男,副研究员,博士,主要从事农机智能装备研究,E-mail: zhangaq@nercita.org.cn

通信作者: 孟志军(1975—),男,研究员,博士,主要从事农机智能装备研究,E-mail: mengzj@nercita.org.cn

calculation, display, and storage of soil capacitance signals and pressure signals. Based on this system, the influencing factors of soil moisture detection models were explored, and a soil moisture detection model based on BP neural network was constructed. The modeling experiment results showed that when the soil moisture was in the range of 7.23% to 21.14%, the model's predictive performance indicators R^2 , RMSE, and RPD were 0.927, 0.008, and 3.70, respectively, with good predictive performance. Finally, the constructed model was integrated into the online soil moisture detection system and bench and field validation experiments were conducted. The results of bench test showed that the fitting coefficient R^2 of soil moisture content was 0.852 ~ 0.927. The absolute error range of soil moisture prediction results was from -2.89% to 2.57%, and the average absolute error was 1.01%. The field test results showed that the coefficient of determination R^2 of the fitting curve between the soil moisture monitoring value and the actual value was 0.842, and the absolute error range of soil moisture monitoring was from -0.96% to 0.45%, with an average absolute error of 0.39%. This indicated that the performance of the detection system developed met the needs of soil moisture monitoring during field operations of corn seeders.

Key words: corn seeding; soil moisture content online detection system; capacitance; depth

0 引言

玉米是我国第一大粮食作物,其稳产、高产、优产对于保障国家粮食安全具有重要意义^[1-2]。玉米精密播种技术作为提升玉米产量和品质的重要手段,主要是通过精确调控播种行距、粒距等参数得以实现,但目前该技术在播深调控方面尚显不足,尤其缺乏基于播种种沟土壤微环境的播深主动调控技术^[3-4]。土壤墒情作为种沟土壤微环境的重要指标之一,是影响播种品质的关键因素,在促进种子萌发和出苗方面具有重要作用^[5]。国内现有的播种作业装备缺乏对种沟墒情的在线检测功能,导致作物的种植策略无法基于土壤墒情实时调整,直接影响种子发芽率和生长品质。当前土壤墒情检测的方法主要有介电法、近红外光谱法、微波法、中子法等^[6-9],这些方法为土壤墒情传感器研制提供了技术支撑。

目前,国内外土壤墒情传感器的研究多集中于原位检测方面,面向播种环节的土壤墒情在线检测研究较少。基于播种机领域的土壤墒情在线检测的研究多采用近红外光谱法和介电法两种方法,WHEATHERLY等^[10]基于电阻法的原理,通过将两个刀形电极组成的土壤干燥面传感器安置于播种机上,实现对土壤含水率的实时测量。MALEKI等^[11]在基于近红外光谱技术的基础上,开发了一套土壤墒情动态在线测量系统。张东兴等^[12]设计了一种可见光-近红外式土壤水分传感器,实现了对播种沟土壤水分测量。杨术明等^[13]基于FDR技术研制了一种水分传感器的变量穴施水穴播机,该机具通过六杆机构驱动水分传感器在作业过程中交替插入土壤测量其含水率。杜一童^[14]基于时域反射测量原理,设计了一套探针式传感器的土壤含水率动态测量系

统,试验结果表明,通过该系统采集的数值具有一定测量精度。近红外光谱法因高昂的制造成本、复杂的仪器标定和对环境要求苛刻而受到限制。综合考虑技术难度、灵敏度及成本等因素,介电法检测原理更适用于土壤墒情动态在线检测。

为实现对玉米播种土壤墒情精准动态测量,本文通过对玉米播种机的实际作业环境与工作原理进行分析,对玉米精密播种种沟土壤墒情在线检测系统机械结构进行设计,提出一种基于电容法和土壤深度补偿的土壤墒情检测方法。在此基础上,研究确定最佳极板参数,构建土壤墒情定量分析模型,集成开发土壤墒情在线检测系统。以期为玉米精密播种智能调控提供技术支撑。

1 检测系统设计

1.1 原理与结构

1.1.1 检测原理

基于电容法和土壤深度补偿的土壤墒情检测方法采用电容法获取土壤含水率与电容的数值关系,并利用土壤压力信号间接获取土壤深度修正土壤含水率的检测模型,从而实现土壤墒情的准确在线检测。

土壤墒情在线检测系统是利用水和土壤在介电常数上的差异和介电常数与电容的关系,实现对土壤墒情的初步检测。结合系统作业中土壤的流态特性与电容法测量的灵敏性,选用平行极板式作为系统电容器结构,其原理如图1所示。

由于玉米播种机作业的田间环境复杂多样,使得土壤墒情在线检测装置在动态获取被测土壤的电容数据时,其电容传感器的检测信号受到多种因素的影响,尤其是田间地面的起伏不平 and 土壤分布不均等问题,导致的土壤深度的变化,这亦是影响电容数据

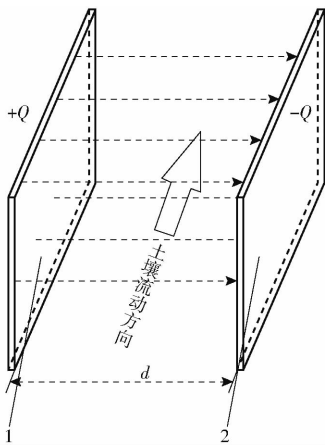


图 1 平行电容极板检测原理图

Fig. 1 Schematic of parallel capacitor plate detection

1. 左电容极板 2. 右电容极板

检测的关键因素之一。随着土壤样本紧实度增加,使得单位体积内的样本储存电场能的容量变大,导致电容传感器测得电容增加。而不同的土壤深度也会造土壤样本紧实度不同,因此土壤深度是影响土壤电容的一个重要指标。基于此,为提高电容检测精度,拟引入土壤深度这一参数对土壤墒情检测模型进行修正,实现土壤墒情准确监测。

土壤深度信息在系统作业中难以实时获取,但是,不同的土壤深度会造成检测装置承受不同的压力。其原理是随检测装置作业深度增加,其作业工况内土壤紧实度增高,导致装置整体受力增大^[15]。此外,系统作业中电容器和压力传感器紧挨会出现相互干扰的现象。因此,通过在检测装置底板上布置压力传感器以采集装置内部受到的压力,建立压力与土壤深度之间的定量函数关系,从而获取待测区域土壤深度信息。

1.1.2 系统结构

基于玉米播种机在田间的实际作业工况,并考虑装置在作业过程与土壤的接触形式以及机械振动等因素的影响,为可靠获取土壤电容、压力数据,设计的土壤墒情在线检测装置机械结构如图 2 所示,该系统主要由开沟机构、连接机构两部分组成。开沟机构主要由 1 对开沟器、1 对电容极板、1 对环氧树脂板、2 对垫片和 1 块底部固定板组成。其中,电容极板镶嵌于环氧树脂板的凹槽,采用沉头螺栓固定环氧树脂板于开沟器内侧凹槽,以隔离电容极板与开沟器,提升电容数据的采集精度;以相对且平行的方式放置开沟器(包括内置材料),使用垫片和螺母将开沟器分离并固定;底部固定板用于固定开沟器之间的距离,表面安装有 F4046 型薄膜式压力传感器(柔希电子科技有限公司),通过压力传感器采集不同深度土壤对固定板的压力信号,为土壤深度

的预测提供数据支撑。连接机构则主要由连接架和固定件组成,固定件平行与连接架放置,通过调节其与农机横梁的位置,改变检测系统距地表高度,实现不同深度土壤检测。

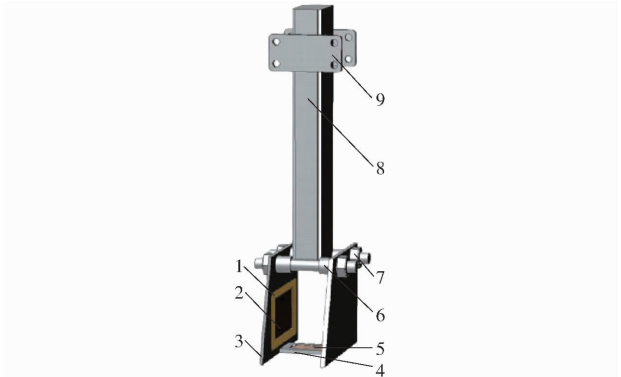


图 2 土壤墒情在线检测系统机械结构图

Fig. 2 Structure of online soil moisture detection system

1. 开沟器 2. 电容极板 3. 环氧树脂板 4. 底部固定板 5. 压力传感器 6. 垫片 7. 螺母 8. 连接架 9. 固定件

1.2 电容极板结构仿真设计

平行电容极板间的电场线在由内向外扩展的过程中,由原先的平行分布逐渐变为曲线状,导致电场强度在极板边缘区域显著增强。这种变化常常使得电容传感器的探测灵敏度受到边缘效应所产生的附加电容的干扰。为此,利用仿真软件工具,获取不同结构参数下的电容极板电容,并将其与理论计算公式所得的电容进行对比,对电容极板结构进行合理设计,降低边缘效应所带来的影响,提高电容传感器检测性能。已知,电容器电容理论计算公式为^[16]

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d} \tag{1}$$

式中 ε_0 ——真空介电常数
 ε_r ——介质相对介电常数
 A ——极板相对面积, mm^2
 d ——极板间距, mm

为模拟土壤墒情在线检测系统实际作业情况,本文利用软件 Ansys Maxwell 2021,在网格划分条件下构建了平行电容器的三维仿真模型,并分别对两侧电容极板施加 0 V 和 3.3 V 电压。同时,将模型周围的静电场模拟成田间均匀分布的土壤实体进行仿真试验。平行电容器仿真模型如图 3 所示。

文献[17]研究表明,电容器灵敏度受到极板间距、厚度和相对面积因素的显著影响。综合考虑土壤墒情在线检测系统开沟机构尺寸、玉米落种器开沟宽度范围(2.5 ~ 4 cm)以及种子下落偏移等因素^[18],设定了 15 组仿真参数,具体包括:极板间距为 50、60、70、80、90 mm,极板厚度和相对面积为 1.5 mm 和 6 000 mm^2 ;极板厚度为 0.5、1、1.5、2、

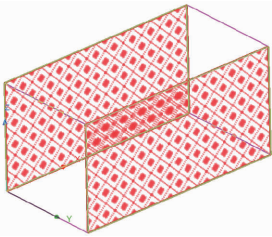


图 3 三维仿真分析模型

Fig. 3 Construction of parallel capacitor simulation model

2.5 mm, 极板间距和相对面积为 70 mm 和 6 000 mm²;极板相对面积为 5 000、5 500、6 000、6 500、7 000 mm²,极板间距和厚度为 70 mm 和 1.5 mm。

为明晰三因素造成边缘效应的影响权重,利用 Design-Expert 13 软件中的 Box – Behnken 响应面法进行极板间距 d 、极板宽度 h 和极板相对面积 A 因素的三水平试验设计,试验因素水平见表 1,试验方案和结果见表 2。

表 1 试验因素水平

Tab.1 Experimental factors and levels

水平	极板间距	极板厚度	极板相对面积
	d/mm	h/mm	A/mm^2
1	50	0.5	5 000
2	70	1.5	6 000
3	90	2.5	7 000

表 2 试验方案与结果

Tab.2 Test program and result

试验号	因素			仿真 电容/ pF	理论 电容/ pF	电容比 C/C'
	极板间距 d/mm	极板厚度 h/mm	极板相对面 积 A/mm^2			
1	50	1.5	7 000	49.54	50.60	1.021
2	90	0.5	6 000	23.59	23.61	1.001
3	70	1.5	6 000	30.33	30.80	1.015
4	70	0.5	5 000	25.28	25.30	1.001
5	70	0.5	7 000	35.39	35.42	1.001
6	90	2.5	6 000	23.59	24.15	1.024
7	90	1.5	5 000	19.66	19.90	1.012
8	70	1.5	6 000	30.33	30.80	1.015
9	70	2.5	7 000	35.39	36.46	1.030
10	70	1.5	6 000	30.33	30.80	1.015
11	70	2.5	5 000	25.28	26.04	1.030
12	50	2.5	6 000	42.46	44.27	1.043
13	70	1.5	6 000	30.33	30.80	1.015
14	90	1.5	7 000	27.52	27.86	1.012
15	50	0.5	6 000	42.46	42.50	1.001
16	70	1.5	6 000	30.33	30.80	1.015
17	50	1.5	5 000	35.39	36.14	1.021

将上述试验数据进行多种模型方差分析,结果如表 3 所示。从表 3 可以看出,所构建的 4 种模型均具备较强的显著性,其 P 值均低于 0.05 的临界

表 3 多种模型方差分析

Tab.3 Variance analysis of various models

方差来源	P 值	R^2_{adj}	R^2_{pre}
线性模型	<0.000 1	0.942 5	0.903 1
双因素	<0.000 1	0.990 3	0.972 9
二次方程	0.046 1	0.995 3	0.966 9
三次方程	<0.000 1	1	

值。通过进一步对比和分析 4 种模型,可以发现双因素方差模型效果最佳,预测 R^2 为 0.972 9。

为精确地描述极板结构对电容的影响规律,对模型进行了回归拟合,并略去模型中不显著项,得出电容比与极板间距和厚度因素之间关系的双因素方差模型为

$$Y = 1.02 - 0.0046d + 0.0154h - 0.0047dh + 0.0014d^2$$

(2)

式中 Y ——仿真电容 C 与理论电容 C' 比值

将试验数据通过 Design-Expert 13 软件进行处理分析后,获得电容器极板最优结构参数为:极板间距 75.8 mm、极板厚度 0.7 mm、极板相对面积 5 073 mm²,其长度为 100 mm,宽度为 50.73 mm。

1.3 硬件设计

土壤墒情在线检测系统硬件原理图如图 4 所示,主要由信息采集单元和数据处理单元组成,用于将各类传感器采集信号传递到单片机中进行信号的分析 and 处理,并将处理完的数据上传至土壤墒情在线检测系统。

信息采集单元主要包括 2 路传感器,其中,电容传感器为 FDC2214 型(武汉星林信息技术有限公司),该传感器可消除检测过程的零漂、温漂干扰,实现数字信号的准确采集,采用 I²C 通讯协议,供电电压为 3.3 V,检测上限为 250 nF;压力传感器为 F4046 型(柔希电子科技有限公司),该传感器通过将输出的电阻转换为电压信号和高电平信号,实现检测压力变化,供电电压为 3.3 V,检测压力为 20 N。数据处理单元选用 STM32F103 型单片机(意法半导体(ST)公司),通过单片机可实现采集传感器信号同时分析数据。

1.4 软件设计

土壤墒情在线检测系统的软件基于 Matlab 2021a 平台进行开发,该系统主要具有采集信号、信号处理、实时显示及存储功能,系统的具体流程如图 5 所示。启动检测系统并设置其软件界面至初始状态,随后将基于实测土壤含水率、电容和压力所建立的函数模型集成至系统中,通过对试验所需的各项数据参数进行获取,以确保系统界面能够正常运行。在系统检测过程中,为更加直观地展示土壤电

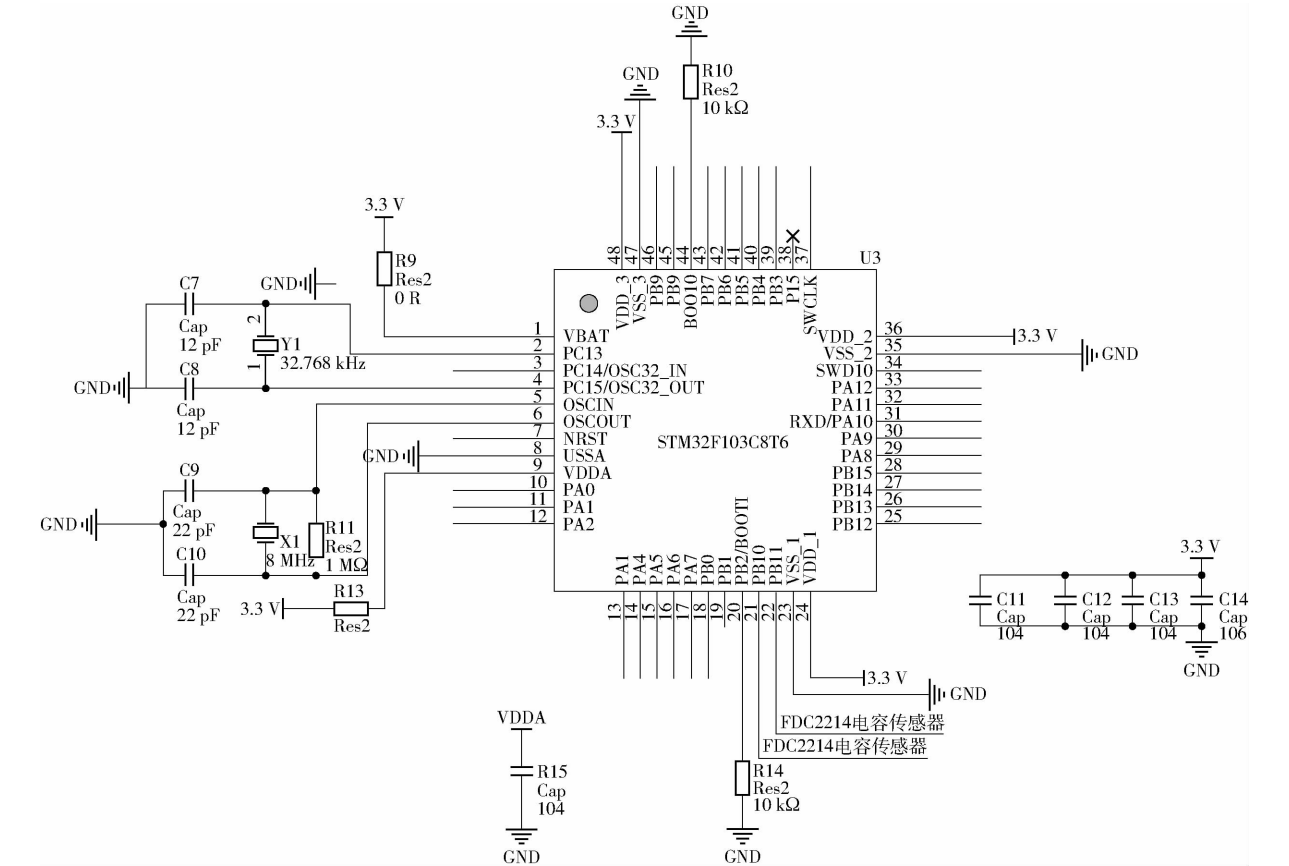


图 4 土壤墒情在线检测系统硬件原理图

Fig. 4 Hardware principle diagram of online soil moisture detection system

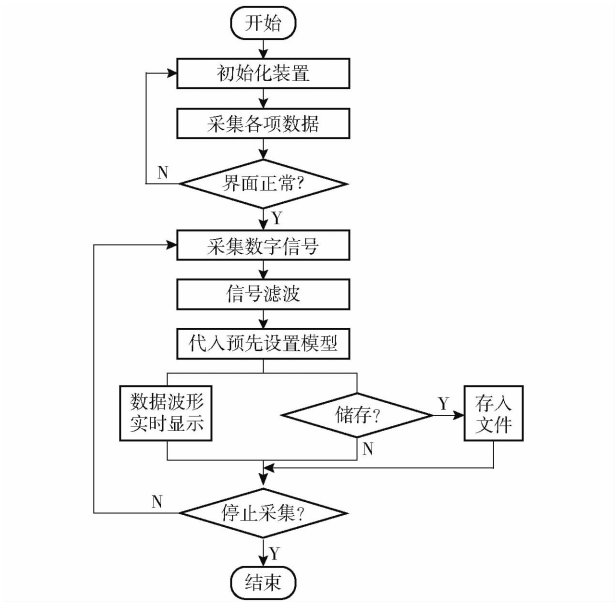


图 5 土壤墒情在线检测系统程序流程图

Fig. 5 Program flow chart of online soil moisture detection system

容与其墒情之间的动态关系,将数据以波形图方式在界面中进行实时显示。此外,为便于后期对数据进行分析处理,设置了数据存储模块放在独立的循环中,该模块以 .xlsx 的电子表格形式将数据独立存储,其存储内容包括:数据采集序号、作业时间、含水率、电容和压力数据。最后,根据作业流程手动控制

数据保存开始和停止。

基于 Matlab 2021a 平台搭建的土壤墒情在线检测主界面如图 6 所示,主要功能为:①数据处理功能,将电容传感器和压力传感器采集数据传递至下位机中,通过土壤墒情检测模型对数据进行处理,最终得出含水率。②数据实时显示功能,实现土壤电容与含水率的关联,并通过图像与数据实时显示。③数据存储及清除功能,实现试验完成后数据的存储及清除,便于对试验数据后续分析和处理。



图 6 土壤墒情在线检测系统主界面

Fig. 6 Main interface of online detection system for soil moisture

2 检测模型构建

2.1 土壤电容检测影响因素

以土壤深度和运行速度为影响因素,针对土壤

墒情在线检测系统,开展控制变量试验,以探讨土壤深度和运行速度对土壤墒情在线检测系统检测性能的影响。

2.1.1 土壤电容检测试验

土壤电容检测试验在北京市昌平区国家精准农业研究示范基地进行。此试验基于自研的土槽试验台开展,将自制的土壤墒情在线检测系统安装在试验台上,并由试验台提供动力进行作业,安装效果如图 7 所示。此外还装有用于测量样本实际含水率的 DHG-9240A 型电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司)、MTB2000D 型电子天平(深圳市美孚电子有限公司)和容积 100 cm³ 的环刀取土器。

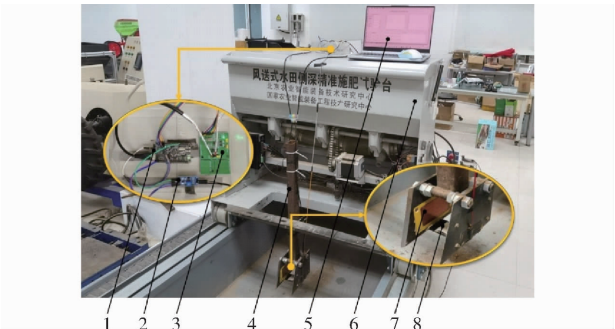


图 7 土壤墒情在线检测系统安装图

Fig.7 Online soil moisture detection device

1. 单片机 2. 薄膜触发器 3. 电容传感器 4. 土壤墒情在线检测机械装置 5. 上位机数据采集软件 6. 土槽试验台 7. 电容极板 8. 压力传感器

以田间土壤为试验对象,为确保试验结果客观性,从试验田不同区域随机采集相同质量土壤样本。最后,将采集的土壤样本均匀混合后,存放在室温为 21℃ 的环境下。

为获取充足的试验数据、降低试验成本,将土槽试验台等量划分为 5 个区域。按照各区域体积,将采集的土壤分成相应份数,并在每份土壤样本中添加不同质量的去离子水进行配制。根据玉米的最佳播种环境土壤体积含水率为 16% ~ 18%,试验总共制备 30 份体积含水率为 7.23% ~ 21.14% 的土壤样本。

综合考虑《土壤墒情监测规范》(SL 364—2015)中关于播种土壤深度的监测标准以及玉米播种深度在正常环境下的适宜范围,试验利用土壤墒情在线检测系统,在土壤深度分别为 5、6、7 cm 的试验条件下,采用 4 种速度(0.4、0.8、1.2、1.6 cm/s)对 30 份土壤样本进行了电容和压力采集,并取其平均值作为该样本在某一运行速度下和某一深度下测得的电容和压力^[19]。

试验后,利用环刀取土器、电子天平和电热鼓风干燥箱测量每份样本体积含水率。土壤体积含水率

计算式为

θ=ρM0−M1M1×100% (3)

式中 θ——土壤体积含水率, %

M₀——土壤鲜质量, g

M₁——土壤干质量, g

ρ——土壤干容重, g/cm³

2.1.2 影响因素及规律

采用控制变量法分析土壤电容、墒情采集的影响因素及规律。

图 8a 为土壤深度 6 cm 下,不同速度获取的土壤样本电容随样本含水率增加的变化曲线。分析可知,检测系统电容不会随速度变化而发生明显变化。因此,本研究搭建的土壤墒情在线检测系统不受作业速度的影响。

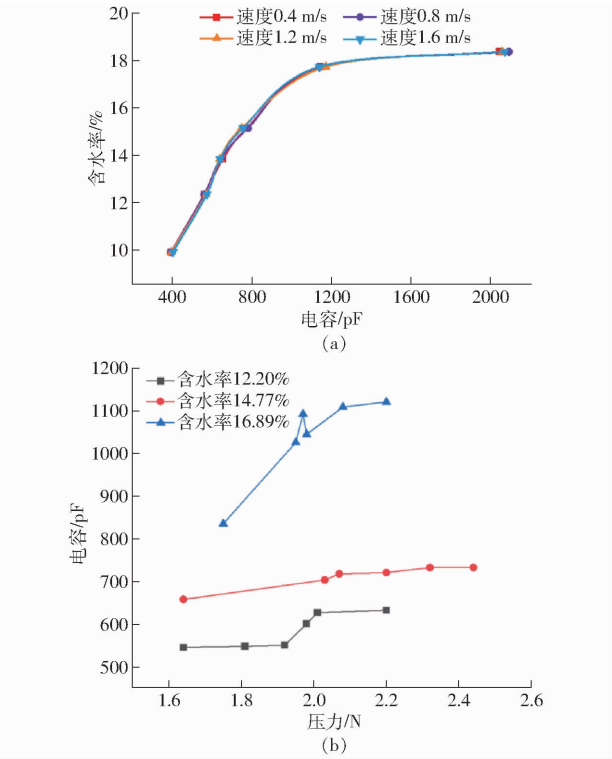


图 8 各因素对土壤电容的影响

Fig.8 Effects of various factors on soil capacitance

图 8b 为速度 1.2 m/s 下,不同含水率获取的土壤样本电容随样本压力的变化曲线。分析可知,在固定速度且相同含水率条件下,随着待测土壤压力增大,检测电容整体呈增加趋势,且样本含水率越高,这种趋势越显著。基于上述变化规律可知,待测土壤的压力变化对电容检测结果有影响,因此本文提出的土壤深度补偿监测原理准确。

2.2 基于 BP 神经网络的检测模型构建

为降低自然环境不可控因素的干扰,精准建立土壤电容、深度与含水率之间的函数关系,提升土壤

墒情检测结果的准确性,采用处理非线性拟合能力强的 BP 神经网络建立土壤墒情检测模型,并以决定系数 (Coefficient of determination, R^2)、均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 和相对预测偏差 (Residual predictive deviation, RPD) 作为模型性能评价指标^[20]。

BP 神经网络主要由输入层、隐含层和输出层构成,具有很强的非线性映射能力,可以有效地解决各个输入参数之间的非线性,网络构建步骤如下:

(1)网络拓扑结构选择

在土壤墒情在线检测系统作业过程中,考虑到其土壤墒情检测的作业质量受到多种因素的影响以及 3 层神经网络可以满足任意 n 维到 m 维的映射,故选用 3 层 BP 神经网络结构。

(2)输入、输出层参数确定

为了构建简洁高效的 BP 神经网络模型,基于农机农艺要求,本文所采用的 BP 神经网络输入层参数为土壤墒情在线检测系统作业中采集的土壤样本电容和压力数据,输出层参数为被测样本实际土壤墒情数据。

(3)隐含层节点数确定

隐含层节点数为 BP 神经网络重要组成部分,可以对神经网络非线性映射能力产生直接影响。通过多次试验对比以及神经网络训练误差,确定最佳隐含层节点数为 5 时,构建的神经网络预测性能最佳,具体 BP 神经网络预测模型结构如图 9 所示。

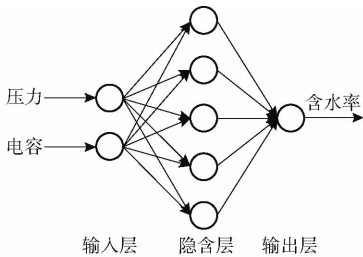


图 9 土壤墒情在线检测系统性能预测的 BP 神经网络模型
Fig. 9 BP neural network model for performance prediction of online soil moisture detection system

(4)网络函数选择

考虑到预测模型应满足收敛速度快、误差小、训练效果优等特点,通过反复试验确定 BP 神经网络的隐含层传递函数为 S 型正切函数 tansig,隐含层到输出层的传递函数为线性函数 purelin,训练函数为 trainlm 函数。

2.3 模型性能

为分析本文所提出的土壤墒情检测模型准确性,通过试验获取 90 组样本数据。其中,自变量为电容和压力,因变量为含水率,并采用留出法随机选取 2/3 样本数据作为校正集样本,剩余数据

作为测试样本,完成检测模型构建,建模结果如表 4 所示。

表 4 基于 BP 算法的土壤墒情检测模型预测结果
Tab. 4 Results of water content detection model based on BP algorithm

输入参数	校正集			测试集		
	R^2	RMSE	RPD	R^2	RMSE	RPD
电容	0.899	0.012	3.15	0.835	0.012	2.46
电容和压力	0.942	0.009	4.15	0.927	0.008	3.70

由表 4 可知,预测模型引入压力参数,对于模型精度提升具有显著的影响,最终基于 BP 神经网络算法建立的土壤墒情检测模型拟合能力强、预测精度高且性能稳定,可以满足使用需求。最终,将检测模型集成到土壤墒情在线检测系统,以满足土壤墒情在线检测系统在数据处理速度、含水率预测精度和响应时间方面土壤墒情动态检测需求。

3 系统性能试验

为了验证本文设计的玉米精密播种沟土壤墒情在线检测系统的性能是否符合设计要求,进行了动态试验。性能试验包括台架试验和田间试验,台架试验通过土壤墒情在线检测系统试验台开展;田间试验通过将土壤墒情在线检测系统安装在玉米播种机上,并在田间开展。

3.1 台架试验验证

为验证土壤墒情在线检测系统的作业效果,于 2023 年 11 月在北京小汤山国家精准农业研究示范基地实验室,对开发的土壤墒情在线检测系统开展了台架试验,试验现场如图 10 所示。

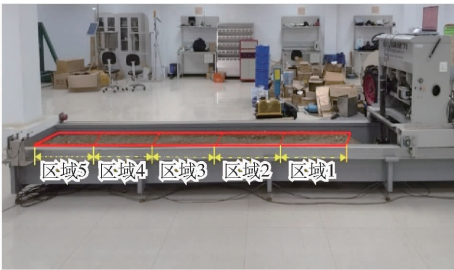


图 10 台架试验现场
Fig. 10 Bench test site

试验共开展 8 组(土壤类型为潮土,环境温度 20℃,土壤容重 1.29 ~ 1.39 g/cm³、土壤墒情(含水率)7% ~ 20%),每组试验都包含 9 个子试验。为了确保试验数据可靠性,同组试验均在相近含水率样本下,利用系统分别在 3 种不同土壤深度(5、6、7 cm)和 3 种不同速度(0.8、1.2、1.6 m/s)下开展试验。试验结束后,对每个区域样本含水率实际值进行采集,并将试验中系统获取土壤墒情数据均分为

5 份,取平均值作为不同区域样本墒情检测值,对比土壤墒情检测值与实际值关系。

各组试验数据汇总后,基于土壤墒情实际值与检测值在不同作业工况下的分布情况,如图 11、12 所示。根据表 6 可以看出不同条件下,试验获取的数据点均集中在回归线($Y=X$)附近,土壤墒情实际

值与检测值的决定系数 R^2 均为 0.852 ~ 0.927,土壤墒情在线检测绝对误差为 $-2.89\% \sim 2.57\%$,平均绝对误差为 1.01%,符合 QX/T 567—2020《自动土壤水分观测仪》对野外观测仪器的精度要求^[21]。证明了本文开发的土壤墒情在线检测系统具有较高的准确性和稳定性。

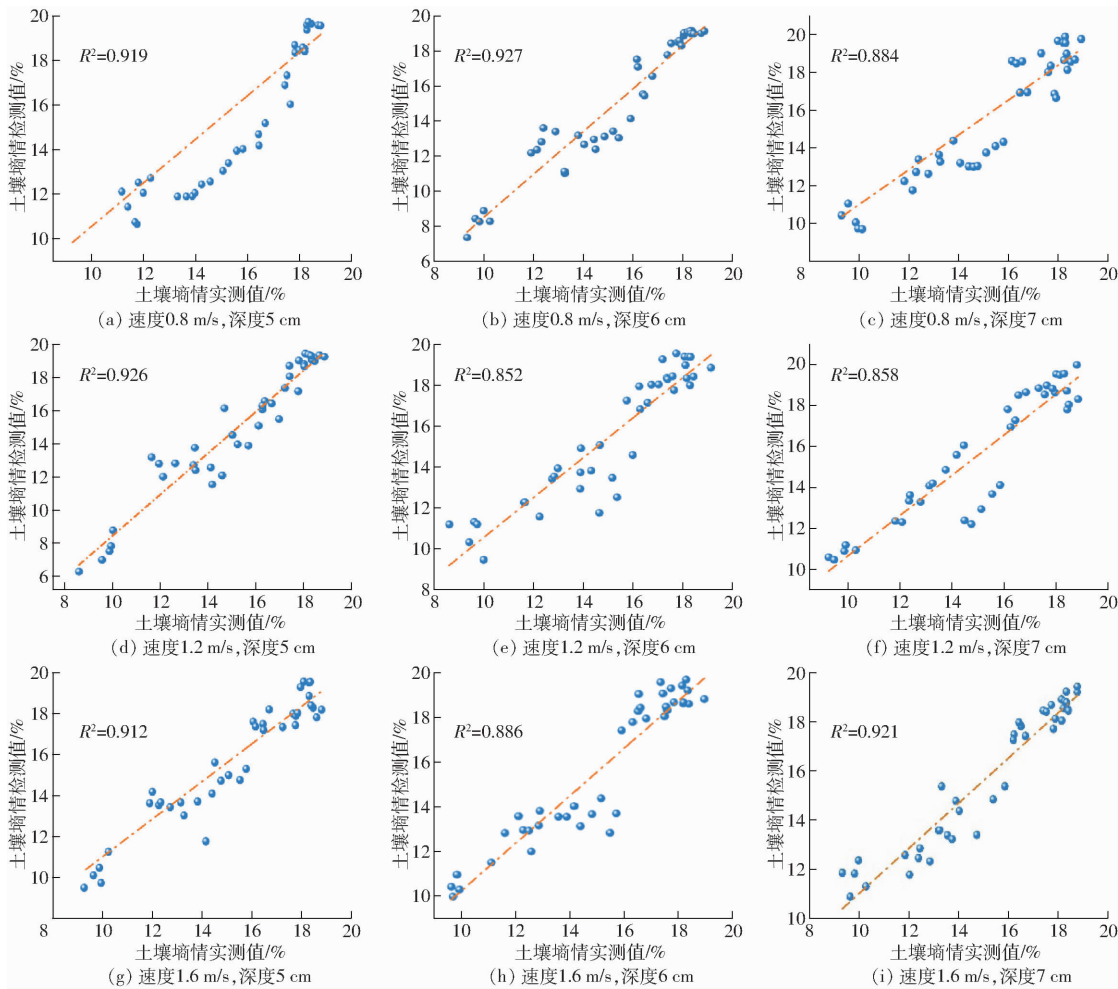


图 11 不同作业工况下测得土壤墒情检测值与实测值对比

Fig. 11 Comparison of soil moisture content detection values and true values under different working conditions

3.2 田间试验

为验证玉米精密播种种沟土壤墒情在线检测系统的田间实际作业效果,于 2024 年 3 月初在北京小汤山国家精准农业研究示范基地开展了田间试验,试验选取一块长度为 60 m,宽度为 8 m 的田间区域,作为本次田间试验的检测区域。试验现场如图 13 所示。

为了确保试验的准确性和数据采集的完整性,以便更精确地检测和分析土壤墒情的变化,根据场地的面积将其划分为 6 个小区,每个区域长度为 10 m,宽度为 8 m,并进行 5 次田间试验。每次试验开始时,启动拖拉机以速度 2 km/h 牵引玉米播种机上装配的土壤墒情在线检测系统在已划分的不同区域内进行移动,并实时记录各个区域内深度 5 ~

7 cm 的土壤墒情。

每次试验结束后,在每个划分的区域内,采用环刀取土法随机选定 3 个不同位置进行土壤样本的采集,并计算这些样本墒情平均值,以此作为该区域土壤墒情的实际值。同时,将检测系统在不同区域采集到的土壤墒情数据进行平均处理,作为该区域土壤墒情检测值。

田间试验共进行 5 次,获取 30 组试验数据(土壤类型为潮土,环境温度 15℃,土壤容重 1.29 ~ 1.39 g/cm³,土壤墒情(含水率)为 9.24% ~ 12.88%),软件实时显示结果界面如图 14 所示。图 15 展示了各次试验中土壤墒情实际值与检测值拟合关系,数据点主要聚集在回归线($Y=X$)周围,表明二者之间具有高度的一致性。试验结果显示,

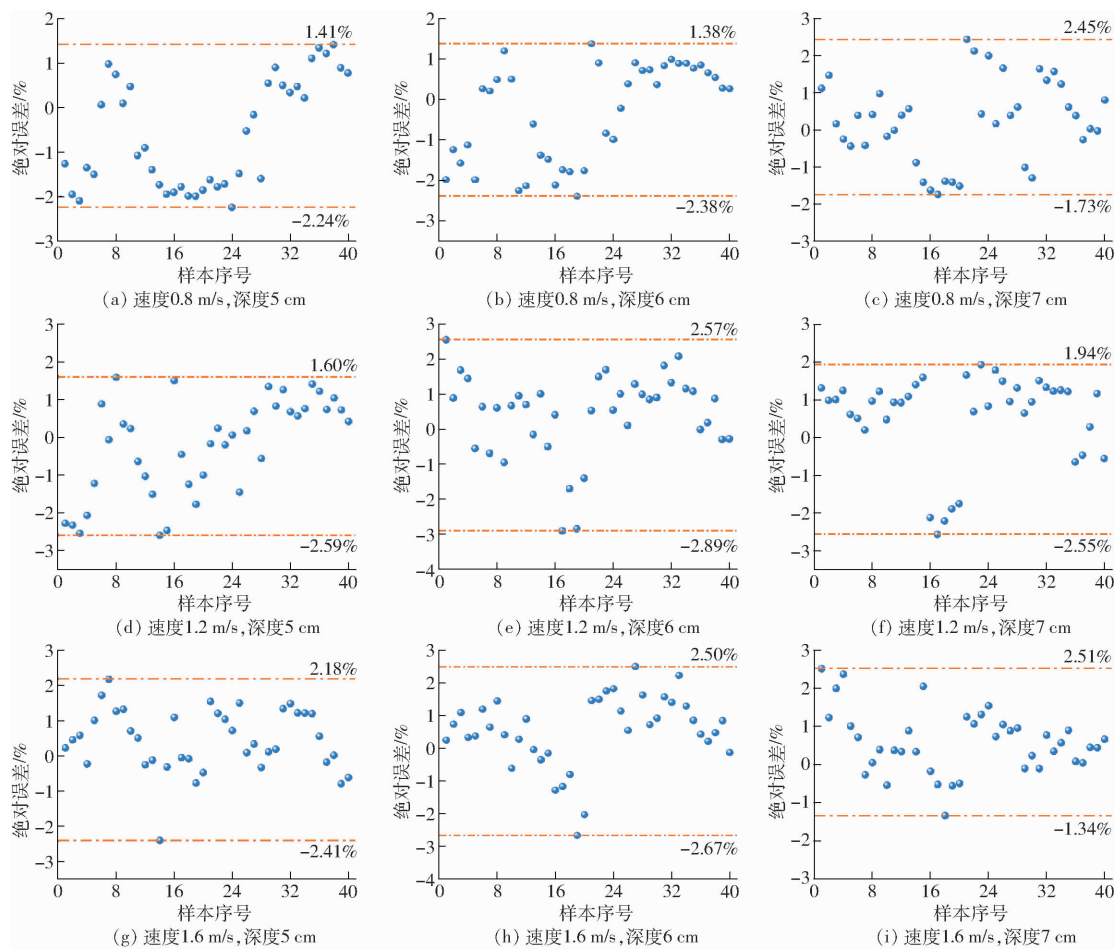


图 12 不同作业工况下测得土壤墒情检测值的绝对误差

Fig. 12 The absolute error of soil moisture content detection values measured under different working conditions

表 6 不同作业工况试验结果

Tab.6 Summary of test data under different operating conditions

土壤深度/cm	速度 0.8 m/s		速度 1.2 m/s		速度 1.6 m/s	
	R^2	绝对误差/%	R^2	绝对误差/%	R^2	绝对误差/%
5	0.919	-2.24 ~ 1.41	0.926	-2.59 ~ 1.60	0.912	-2.41 ~ 2.18
6	0.927	-2.38 ~ 1.38	0.852	-2.89 ~ 2.57	0.886	-2.67 ~ 2.50
7	0.884	-1.73 ~ 2.45	0.858	-2.55 ~ 1.94	0.921	-1.34 ~ 2.51



图 13 田间试验现场

Fig. 13 Field test site

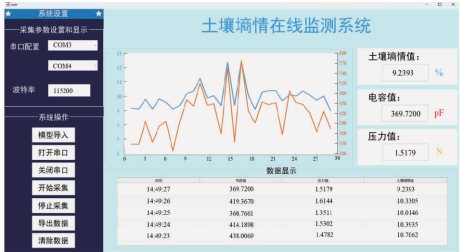


图 14 土壤墒情在线检测显示结果

Fig. 14 Showing of online detection of soil moisture results

土壤墒情实际值与检测值拟合曲线决定系数 R^2 达到 0.842, 显示出较强的相关性。同时, 土壤墒情检测绝对误差在 $-0.96\% \sim 0.45\%$ 之间波动, 试验平均绝对误差为 0.39%, 满足实际作业中土壤墒情检测需求。

4 结论

(1) 针对现有玉米播种装备缺乏土壤墒情在

线检测系统, 且已有的土壤墒情在线检测系统检测精度不高、环境适应差的问题, 本文通过对玉米精密播种种沟土壤墒情在线检测系统实际作业环境进行分析的基础上, 开发设计了土壤墒情在线检测系统机械结构, 并提出了一种基于电容法和

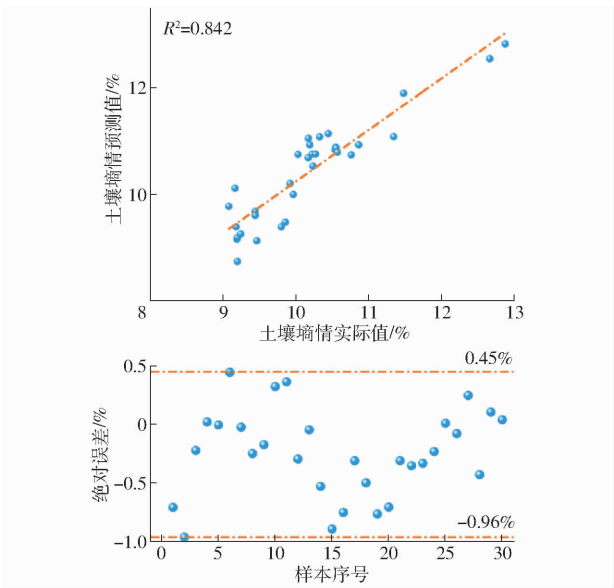


图 15 田间预测结果及绝对误差比较
Fig. 15 Comparison of field prediction results and absolute errors

深度补偿原理的土壤墒情在线检测方法,并在此基础上,进行了极板结构优化设计和软硬件系统

的搭建,完成了机载式土壤墒情在线检测系统开发。其中,获得的最佳极板参数组合为:极板间距 75.8 mm、极板厚度 0.7 mm、极板相对面积 5 073 mm²。

(2)利用系统获取在不同作业工况下的电容、压力和含水率数据,探究了土壤墒情检测模型的影响因素,并基于 BP 神经网络建立了土壤墒情检测模型。建模结果表明,当土壤墒情为 7.23% ~ 21.14% 时,模型预测性能指标 R^2 、RMSE 和 RPD 分别为 0.927、0.008 和 3.70,预测效果较好。

(3)开展了玉米精密播种种沟土壤墒情在线检测系统性能验证试验。试验结果表明,田间作业工况条件下土壤墒情检测的绝对误差为 -0.96% ~ 0.45%,平均绝对误差为 0.39%。试验结果符合 QX/T 567—2020《自动土壤水分观测仪》对野外观测仪器的精度要求,表明该系统具有较高的准确性和稳定性,能够满足玉米播种机田间作业时土壤墒情检测的需求。本文研发的系统可为玉米精密播种智能调控技术提供技术支撑。

参 考 文 献

[1] 仇焕广,李新海,余嘉玲. 中国玉米产业:发展趋势与政策建议[J]. 农业经济问题,2021(7):4-16.
QIU Huangang, LI Xinhai, YU Jialing. China maize industry: development trends and policy suggestions[J]. Issues in Agricultural Economy, 2021(7):4-16. (in Chinese)

[2] 李少昆,赵久然,董树亭,等. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学,2017,50(11):1941-1959.
LI Shaokun, ZHAO Jiuran, DONG Shuting, et al. Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11):1941-1959. (in Chinese)

[3] 叶盖·巴依苏勒坦. 播种机产品质量与发展方向分析[J]. 农机使用与维修,2022(6):57-59.

[4] 杜木军,陈永亮,窦钰程,等. 玉米高速播种机应用情况与发展趋势分析[J]. 农机使用与维修,2020(9):28-29.

[5] ROBINSON D A, CAMPBELL C S, HOPMANS J W, et al. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: a review[J]. Vadose Zone Journal, 2008,7(1):358-389.

[6] 胡建东,李林泽,ABDULRAHEEM M I,等. 介电特性土壤水分测定方法研究进展[J]. 河南农业大学学报,2021,55(4):603-611.
HU Jiandong, LI Linze, ABDULRAHEEM M I, et al. Research progress of soil water content measurements using dielectric properties[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2021, 55(4):603-611,638. (in Chinese)

[7] 郭交,白清源,郭文川. 基于超宽带雷达和多光谱数据融合的土壤含水率检测[J]. 农业机械学报,2021,52(9):241-249.
GUO Jiao, BAI Qingyuan, GUO Wenchuan. Monitoring method of soil moisture based on ultra-wide band radar and multispectral data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9):241-249. (in Chinese)

[8] 李久超,李少岩,郭帅,等. 基于微波法的快速测量交通道路土壤含水率的系统[J]. 科技创新与应用,2017(29):20-22.
LI Jiuchao, LI Shaoyan, GUO Shuai, et al. Rapid measurement of soil moisture content in traffic road based on microwave method[J]. Technology Innovation and Application, 2017(29):20-22. (in Chinese)

[9] 蒋一飞,李晓鹏,宣可凡,等. 宇宙射线中子法在农田土壤水分监测中的适用性[J]. 应用生态学报,2022,33(4):909-914.
JIANG Yifei, LI Xiaopeng, XUAN Kefan, et al. Applicability of cosmic-ray neutron sensing for monitoring soil moisture in farmland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(4):909-914. (in Chinese)

[10] WEATHERLY E T, JR C G B. Automatic depth control of a seed planter based on soil drying front sensing[J]. Transactions of the ASAE, 1997,40(2):295-305.

[11] MALEKI R M, MOUAZEN M A, De KETELAERE B, et al. On-the-go variable-rate phosphorus fertilisation based on a visible and near-infrared soil sensor[J]. Biosystems Engineering, 2008,99(1):35-46.

[12] 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. Soil moisture measurement sensor research in seeding ditch based on VIS-NIR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2):218-226. (in Chinese)

[13] 杨术明,李茂强,杨树川,等. 玉米穴播穴灌机水分传感器驱动机构设计[J]. 河北大学学报(自然科学版),2013,33(6):561-566.

YANG Shuming, LI Maoqiang, YANG Shuchuan, et al. Design of soil moisture sensor drive mechanism for corn irrigating hill-seeder[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2013, 33(6):561 – 566. (in Chinese)

[14] 杜一童. 土壤含水率动态检测装置的设计与试验[D]. 北京:中国农业大学, 2020.
DU Yitong. Design and test of dynamic detection device for soil moisture content[D]. Beijing: China Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[15] 姜万礼, 王成宝, 杨思存, 等. 引黄灌区灰钙土水浇地犁底层厚度对土壤紧实度及玉米生长的影响[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(12):1146 – 1149.
JIANG Wanli, WANG Chengbao, YANG Sicun, et al. Effects of the thickness threshold of plow pan on soil compaction and maize growth in grey-calcium soil of Yellow River irrigation area[J]. Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences, 2019, 2(12):1146 – 1149. (in Chinese)

[16] 马广宇. 平行板电容式水稻含水率在线检测装置的优化设计[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2020.
MA Guangyu. Optimised design of parallel plate capacitive rice water content online detection device [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[17] 万霖,唐宏宇,马广宇,等. 翅片式双重极板水稻含水率检测装置优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2):320 – 328.
WAN Lin, TANG Hongyu, MA Guangyu, et al. Optimization design and experiment on finned double plates rice moisture content measuring device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2):320 – 328. (in Chinese)

[18] 周龙. 基于离散元法的玉米种子建模及播种过程的仿真分析与试验研究[D]. 长春:吉林大学, 2021.
ZHOU Long. DEM-based modelling of maize seeds and the simulation analysis and experimental study of the seed-sowing[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)

[19] SL 364—2015 土壤墒情监测规范[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2015.

[20] 刘淮玉. 方捆机草捆含水率在线检测方法 with 装置研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2022.
LIU Huaiyu. Research on online measurement method and device of straw bale moisture content in square baler[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[21] 张召召,雷金洋. 基于频域反射的环式农田土壤水分传感器的开发与试验验证[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2):265 – 271.
ZHANG Zhaozhao, LEI Jinyang. Laboratory calibration and field precision measurement of FDR tubular moisture sensor[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2):265 – 271. (in Chinese)

(上接第 86 页)

[20] 李亚硕,赵博,徐名汉,等. 基于半监督 BP_Adaboost 的农机作业效益评估[J]. 农业工程学报, 2023, 39(23):67 – 74.
LI Yashuo, ZHAO Bo, XU Minghan, et al. Evaluating operation benefit of agricultural machinery using semi-supervised BP_Adaboost[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(23):67 – 74. (in Chinese)

[21] 王培,孟志军,安晓飞,等. 拖拉机功率与深松作业效率关系研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊):87 – 90.
WANG Pei, MENG Zhijun, AN Xiaofei, et al. Relationship between agricultural machinery power and agricultural machinery subsoiling operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.):87 – 90. (in Chinese)

[22] 郑侃,何进,李洪文,等. 作业次序对深松旋耕联合作业机作业质量及功耗的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21):52 – 60.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Influence of working order on working quality and power consumption of subsoiling and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21):52 – 60. (in Chinese)

[23] 马明龙. 机械深松作业质量监测技术研发[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
MA Minglong. Research and development of mechanized subsoiling operation quality monitoring technology [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)

[24] 金慧芳,史东梅,陈正发,等. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7):155 – 164.
JIN Huifang, SHI Dongmei, CHEN Zhengfa, et al. Evaluation indicators of cultivated layer soil quality for red soil slope farmland based on cluster and PCA analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(7):155 – 164. (in Chinese)

[25] 王政. 基于客户满意度的玉米收割机作业调度系统开发[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2023.
WANG Zheng. Development of a corn harvester operation scheduling system based on customer satisfaction [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023. (in Chinese)

[26] 孙琳岚. 农业科技发展水平测度指标与方法研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2011.
SUN Linlan. Study on indicators system and method for the level of development of agricultural science and technology [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2011. (in Chinese)