

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.006

基于 ZigBee 的播种行表层土壤坚实度采集系统*

贾洪雷^{1,2} 李 杨^{1,2} 齐江涛^{1,2} 范旭辉³ 王文君^{1,2} 郭明卓^{1,2}

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025;
3. 吉林省农业机械研究院, 长春 130022)

摘要: 针对目前播种行表层土壤坚实度的获取需人工二次进地测量、实时性差等问题,设计了基于 ZigBee 技术的播种行表层土壤坚实度采集系统。该系统利用传感器测量镇压轮轮辐伸缩量,建立了镇压轮轮辐伸缩量与土壤坚实度之间的数学模型;选用 CC2530 主控芯片实现模块控制、数据无线传输的功能。子节点主控芯片 CC2530 与传感器相连,将传感器的测量数据发送给主节点;主节点接收子节点和车速传感器数据;根据数学模型实现土壤坚实度的测量。为评估系统性能,进行田间试验,结果表明:通过对比系统得到的土壤坚实度与人工测量坚实度,发现二者之间的相对误差平均值为 6.3%,相对误差最大值为 13.3%。该系统能够实现播种行表层土壤坚实度信息的实时采集和无线传输,可为镇压力的实时调整提供技术支撑。

关键词: 精确农业 土壤坚实度 ZigBee 无线采集

中图分类号: S126; S152.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0039-08

Design and Test of Soil Compaction Acquisition System for Sowing Line Surface Based on ZigBee

Jia Honglei^{1,2} Li Yang^{1,2} Qi Jiangtao^{1,2} Fan Xuhui³ Wang Wenjun^{1,2} Guo Mingzhuo^{1,2}

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China
2. Key Laboratory of Bionics Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China
3. Jilin Provincial Academy of Agricultural Machinery, Changchun 130022, China)

Abstract: At present, acquisition of soil compaction for sowing line surface needs people to get into the field again after the operation of agricultural machinery, which is labor intensive, time consuming and belongs to non-real-time measurements. A soil compaction acquisition system for sowing line surface was designed based on ZigBee technology. A linear displacement transducer was used as measuring sensor to measure expansion amount of wheel spoke of press wheel in the system, and CC2530 was chosen as main control chip to realize module control and data wireless transmission. The main control chip CC2530 and the sensor were connected at child node to collect and store the measurement data of the sensor. The measured data of the sensor were sent to the main node. The main node received data from the child node and vehicle speed sensor, and the soil compaction measurement was realized based on mathematical model. The mathematical model was established based on the relationship between expansion amount of wheel spoke of press wheel and soil compaction to realize data acquisition of soil compaction. Field test was conducted to validate the system's performance, which showed an average relative error of 6.3% and maximum relative error of 13.3%. The system can realize real-time acquisition and wireless transmission of soil compaction information for sowing line surface, which can provide technical support for real-time adjustment of pressure.

Key words: Precision agriculture Soil compaction ZigBee Wireless collection

收稿日期: 2015-09-16 修回日期: 2015-10-14
* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2014BAD06B03)和国家自然科学基金资助项目(31401284)
作者简介: 贾洪雷,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作及其智能装备研究,E-mail: jiah1@vip.163.com
通讯作者: 齐江涛,博士后,主要从事精确农业技术及其智能装备研究,E-mail: qijiangtao@jlu.edu.cn

引言

镇压对保证出苗、提高作物产量具有重要意义^[1-6]。土壤坚实度是反映镇压效果的主要物理指标,影响种子的发芽破土率及植物的根系发育状况,同时也直接影响土壤含水率的运移过程,可以为作物出苗率预测、作物产量预估等提供数据支持^[1,7]。目前获取播种行表层土壤坚实度的途径主要是利用坚实度仪测量^[8-10]。

关于坚实度测量仪器方面的研究主要集中在传感器设计和测试模型构建等方面^[7,11-12]。现有方法需要人工二次进地测量、费时费力,且为不连续测量,不具有实时性,在机具作业过程中对播种行表层土壤坚实度实时采集的研究未见报道。实时获取播种行表层土壤坚实度可以为镇压力实时调整提供技术支撑。

镇压轮可实现仿形作业,利用其轮辐伸缩量能够实现播种行表层土壤坚实度的实时测量,不需人员二次进地测量。在镇压轮上安装传感器进行坚实度有线测量时,机构在运动中容易造成电线缠绕^[13],且田间作业环境恶劣,容易造成电缆断裂^[14-15]。无线传感器技术作为一种全新的信息获取技术,在信息采集领域有广阔的应用前景^[16-18]。

本文基于 ZigBee 技术设计播种行表层土壤坚实度无线采集系统,建立镇压轮轮辐伸缩量与播种行表层土壤坚实度之间的数学模型,以期实现播种行表层土壤坚实度远程实时采集。

1 土壤坚实度采集系统工作原理与组成

1.1 镇压轮机械结构组成

仿形弹性镇压轮的结构如图 1 所示^[19]。镇压轮主要由轮壁、辐条套管、辐条、球面轴承等。镇压轮作业时,辐条与辐条套管的相对运动对应不同的镇压力。其中辐条装配结构示意图如图 2 所示,当压缩或拉伸辐条装配时,不同伸缩量对应不同的镇压力,辐条与辐条套管会压缩相应的弹簧实现随地仿形。

1.2 镇压力采集原理

仿形弹性镇压轮工作原理如图 3 所示。镇压轮未作业时,各弹性辐条压缩长度相同,中心轴未发生偏心。作业过程中,当镇压轮遇到农田地表凸起地面时,镇压轮与地面接触压力增大,弹性辐条受到压缩而缩短,镇压轮轮壁相对镇压轮中心轴上移,其状态如图 3a 所示,此时镇压轮中心轴距轮壁与地面接触点距离 H_1 。当镇压轮遇到低洼的地面时,镇压轮

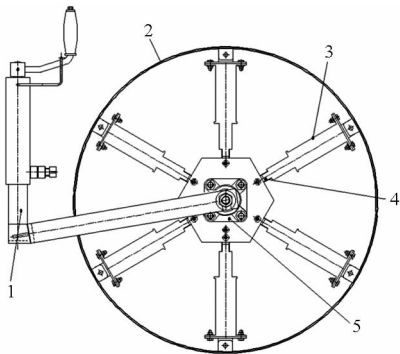


图 1 仿形弹性镇压轮结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of profiling elastic press wheel
1. 高度调节装置 2. 轮壁 3. 辐条套管 4. 辐条 5. 球面轴承

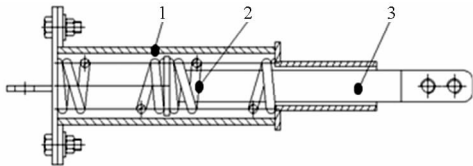


图 2 仿形弹性镇压轮辐条装配结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of spokes assembly
1. 辐条套管 2. 辐条 3. 弹簧

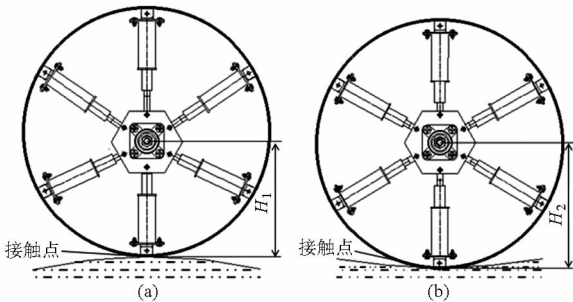


图 3 仿形弹性镇压轮工作原理图

Fig. 3 Schematic diagram of profiling elastic press wheel
(a) 农田地表凸起 (b) 农田地表凹陷

与地面接触压力减小,弹性辐条压缩量减小,镇压轮轮壁相对镇压轮中心轴下移,其状态如图 3b 所示,此时镇压轮中心轴距轮壁与地面接触点距离 H_2 。2 种作业状态下, H_2 大于 H_1 。

镇压力采集原理:直线位移传感器将轮辐伸缩量参数信号转换为电压信号,即辐条套管相对于辐条轴的位移信号。由于镇压轮的镇压力与播种行表层土壤坚实度正相关^[1],可以将直线位移传感器的位移换算为播种行表层土壤坚实度,由此得到播种行表层土壤坚实度。

子节点上的信息获取与处理电路用于接收电压信号并将电压信号转换成 CC2530 用的数据信号,CC2530 按约定的数据格式通过无线发射模块将数据传送出去。主节点上的无线接收模块能够接收前述无线发射模块发来的信号。车速传感器(NJK-5002C(8002C)型霍尔传感器)安装在拖拉机后轮上,用于测量机具前进速度^[18]。主节点接收子节点

和车速传感器数据,通过 RS232 串口传给工控机将数据进行处理并显示。工控机能够实时显示土壤坚实度数据,达到监测土壤坚实度的目的。通过改变传感器安装方式,本系统也可用于其他农业装备关键参数的无线采集。

1.3 镇压压力标定

镇压轮的结构参数会对镇压轮的作业质量产生显著影响^[20],因此需要合理设计选择其结构参数和作业参数。仿形弹性镇压轮的主要结构参数和作业参数为:宽度 260 mm、直径 630 mm、辐条数量为 12 根、弹簧刚度 $K = 11 \text{ N/mm}$ 。

根据东北地区大豆作物农艺要求,对播种后镇压作业的农艺要求压强为 $30 \sim 50 \text{ kPa}$ ^[21],对刚松过土的粘土土壤来说,该镇压轮的下陷量取 $Z_0 = 8 \text{ mm}$ 。

由图 4 得镇压轮的接地面积

$$S = B \widehat{AB} = B\beta r \tag{1}$$

式中 B ——镇压轮宽度, cm
 $\widehat{AB}$ ——镇压轮压实的弧长, cm
 β ——镇压轮压实地面所对应圆心角, rad
 r ——镇压轮宽度半径, cm

经计算得到接地面积 $S = 183.5 \text{ cm}^2$ 。

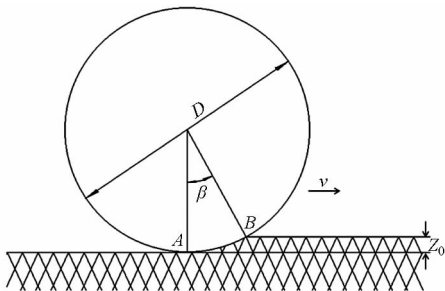


图 4 镇压轮的接地情况

Fig.4 Contact between press wheel and ground

镇压轮轮壁工作时变形较小,可以近似看作不发生弹性变形的刚体,忽略镇压轮下土壤向两侧流动,则接地面上边缘和中心部位的土壤被同等程度的压紧。镇压轮对地面的垂直作用力可近似地认为是在矩形面上均匀分布的。镇压轮理论计算镇压压力 Q 为

$$Q = \rho S \tag{2}$$

式中 ρ ——农艺要求镇压强度, Pa

将式(1)代入式(2)经计算得到作用在镇压轮上的总载荷 $Q = 550 \sim 918 \text{ N}$ 。

通过电子秤与数字示波器记录实测镇压压力 y 与直线位移传感器的压缩位移量信号 x ,对镇压轮的镇压力与直线位移传感器的压缩位移量信号之间的关系进行标定。标定时通过电子秤测量镇压力,测

量时电子秤先水平放置并调零,将镇压轮竖直压在电子秤上,并给镇压轮在 $550 \sim 950 \text{ N}$ 之间每隔 50 N 施加一次压力,测量 3 次取平均值;数字示波器记录对应镇压力下直线位移传感器的信号,标定数据如表 1 所示。

表 1 镇压压力标定数据

Tab.1 Calibration data of suppressed force

序号	镇压力/N	直线位移传感器的信号/V
1	500	0.98
2	550	1.18
3	600	1.29
4	650	1.42
5	700	1.54
6	750	1.67
7	800	1.81
8	900	1.97
9	950	2.07
10	1 000	2.18

通过 Matlab 中的 polyfit 函数得到镇压力 y 与信号数据 x 的拟合图,如图 5 所示。由于变形量与镇压力呈正相关,建立二次函数即可满足要求。得到镇压力 y 与直线位移传感器所对应的信号 x 之间的函数关系式

$$y = 116.1x^2 + 51.77x + 336.4 \tag{3}$$

式中 y ——电子秤实测镇压力, N
 x ——直线位移传感器所对应的信号, V

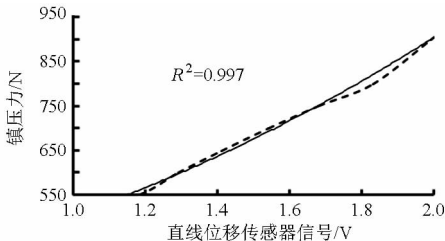


图 5 镇压压力标定数据拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of calibration data of suppressed force

1.4 数据传输模块

设计的镇压力采集系统由主节点和子节点 2 个部分组成。子节点由单片机 CC2530 和直线位移传感器组成。子节点主要负责采集镇压力信息,并将采集到的镇压力数据通过射频收发模块将数据发送到主节点。主节点负责建立网络,并发送和接收指令。主节点对来自子节点的数据进行处理,同时能够接收车速传感器测得的信号,然后才把数据通过 RS232 串口传给工控机。工控机可对数据进行处理、存储和回放。数据采集系统总体架构图如图 6 所示。

2 系统硬件设计

在试验中,ZigBee 的主节点和子节点形成星型

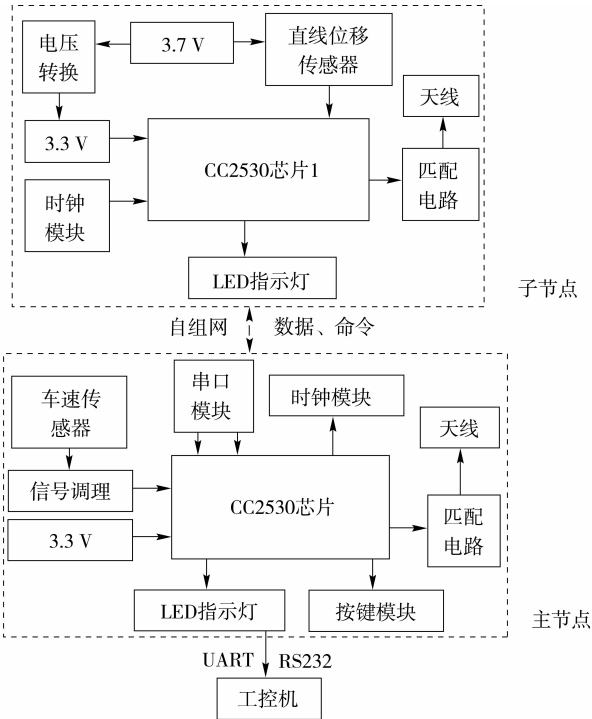


图6 土壤坚实度采集系统总体框架图

Fig.6 Overall frame of soil compaction acquisition system

网络拓扑结构。直线位移传感器置于镇压轮的辐条套筒外壁位置处,镇压力采集模块置于镇压轮的轮壁上,两者按照要求把采集到的数据传给主节点,主节点接收数据,然后才把数据通过 RS232 串口传给工控机。

ZigBee 射频收发模块主芯片采用 TI 公司的 CC2530,该芯片符合 IEEE 802.15.4 的 2.4 GHz 射频收发器,该芯片工作的频率范围为 2 400 ~ 2 483.6 MHz,支持数据传输高达 250 Kb/s,CC2530 集成 RF 收发器、增强工业标注的 8051MCU,可编程 Flash 存储器、8 Kb RAM。本系统选择 256 Kb Flash 存储器。

CC2530 具有多种运行模式,本文用其中的 2 种模式:发射模式和接收模式。CC2530 的定时器 1 为 16 位定时器,具有定时器/脉冲宽度调制 (PWM) 功能。每个计数器捕获通道可以用作一个 PWM 输出或捕获输入信号边沿的时序。在本电路中 CC2530 既承担着 CPU 的功能,又承担着通信模块的作用。

2.1 镇压力数据采集模块

使用的直线位移传感器是深圳米朗科技有限公司生产的 KTC-50 mm 型微型自复位拉杆式直线位移传感器,有限行程 53 mm,线性精度 ±0.5%。主要电气参数如表 2 所示。

子节点主要由直线位移传感器和 CC2530 数据处理传输模块构成。子节点硬件框架图如图 7 所示,分别用 32 MHz、32.768 kHz 的石英谐振器构成

表 2 直线位移传感器电气参数	
Tab.2 Specifications of linear displacement transducer	
参数	数值
电阻/kΩ	1
建议使用电流/mA	≤10
最大工作速度/(m·s ⁻¹)	5
输出类型	0 ~ 100% 给定输入工作电压 (随位移变化而变化)

2 个晶振电路,天线是射频收发模块的重要器件,它直接影响系统的整体性能,系统中使用巴伦匹配电路来进行射频收发信号的匹配。通过子节点将传感器数据进行收集,然后将模拟变量交给 CC2530 进行模数处理,经过无线发射机和网络进行无线传输,即 CC2530 通过 ZigBee 无线电波将数据传送到主节点,主节点通过 RS232 串口将所有信息汇集传至工控机。如果子节点组网成功或者将采集数据传递给主节点都会使 LED 指示灯闪烁。子节点使用 3.7 VDC 电池进行供电,3.3 V 电源由 3.7 V 的电源输入经线性稳压器 AMS1117 稳压后得到。镇压力采集模块安装示意图如图 8 所示。

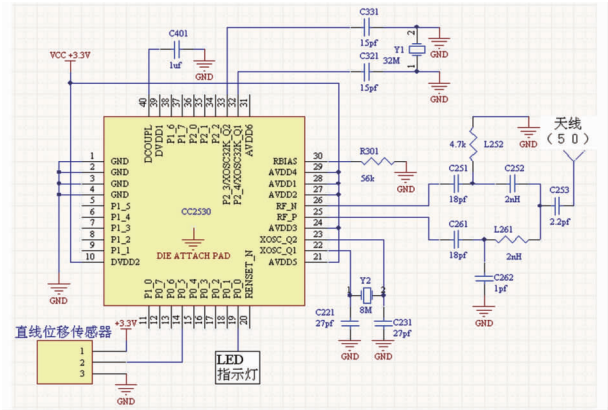


图7 子节点硬件框架图

Fig.7 Hardware frame of child node function

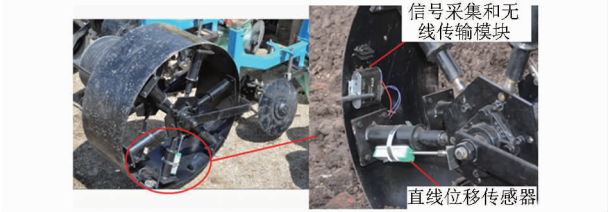


图8 镇压力采集模块安装示意图

Fig.8 Connection diagram of pressure acquisition module

2.2 无线传输模块

镇压力数据采集部分属于 ZigBee 子节点,硬件主要由 CC2530 和直线位移传感器组成。

主节点框架图如图 9 所示。由于 CC2530 工作电压为 3.3 V,所以需要用电压转换模块将外接的供电电压降为 3.3 V。CC2530 是通过串口与 PC 机实现数据通讯的,而 CC2530 的供电电压为 3.3 V,

系统采用 MAX3232 芯片实现 CC2530 与 PC 机之间的电平转换。如果网络建立成功或者有数据进行无线传输都会使 LED 指示灯闪烁。作为网络的控制中心,主节点必须一直处在运行状态,对能量的消耗会很高,因此对主节点的供电使用固定的电源。

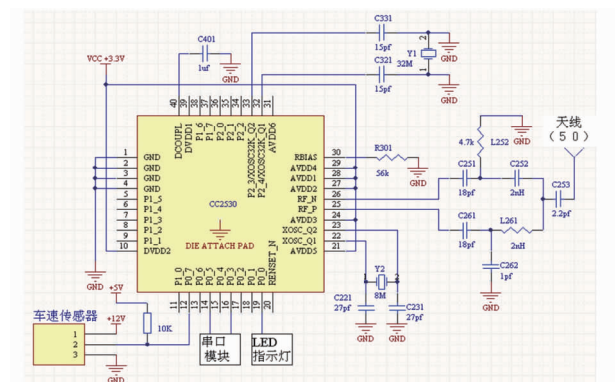


图 9 主节点硬件框架图

Fig. 9 Hardware frame of main node function

3 系统软件设计

传感器网络软件设计的主要任务是无线网络的组网、传感器工作的控制以及数据的采集与收发。子节点主要实现数据的采集与定时发送;主节点一方面负责网络配置与管理,包括定义通信信道、网络标识符(PANID),配置网络的 Profile,响应节点加入网络的请求和绑定请求,为其他节点分配网络地址等。另一方面还接收各子节点发来的数据,将其进行汇聚后通过 RS232 串口传给工控机。

3.1 主节点程序设计

首先上电初始化整个系统,启动主节点建立一个新的网络,子节点寻找并加入网络,主节点即可与子节点进行绑定。绑定完成后子节点即可采集数据并发送数据,主节点负责接收数据,同时接收车速传感器的信号,并通过 RS232 传至工控机显示。在无背景流量干扰下,ZigBee 网络平均延时约为 20 ms^[22],通过车速传感器测得的机具作业速度,结合滞后时间可计算出位置偏移的距离,将此距离用于测量点位置修正,进而消除系统测试过程中的信息滞后。图 10 为主节点的数据采集算法流程图。

3.2 子节点采集程序设计

子节点负责收集直线位移传感器数据,并将收集到的数据进行处理和通信。子节点的软件包括镇压力数据的采集和主节点之间的无线通信程序。在子节点成功加入主节点网络后,子节点的采集和通信程序流程图如图 11 所示。

本系统采用星型网络拓扑结构^[23-24], 传感器子节点通过改变采样频率, 最终确定每隔 100 ms 采集

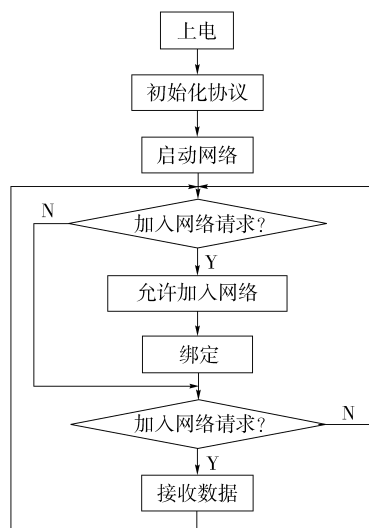


图 10 主节点数据采集算法流程图

Fig. 10 Data acquisition algorithm flow chart of main node function

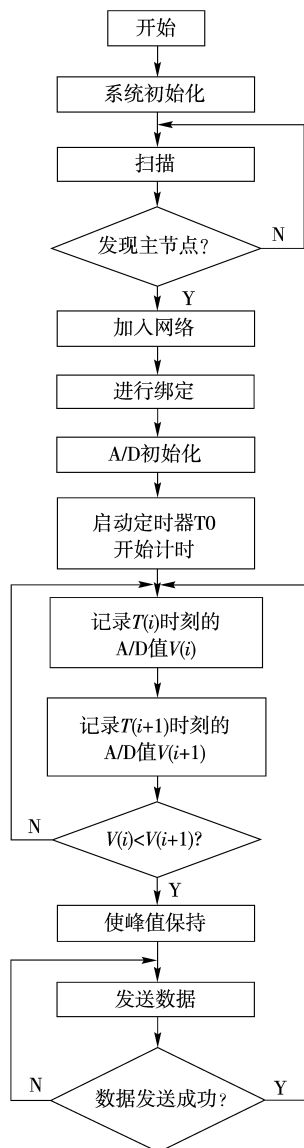


图 11 子节点数据采集算法流程图

Fig. 11 Data acquisition algorithm flow chart of child node function

一次数据并发送给主节点,主节点通过相应的处理再通过串口将数据发送到 PC 机上,串口设置为 COM1,波特率设置为 19 200 bps,数据为 8 bits,无奇偶校验,停止位 1 bit。

程序的开始需要对整个系统进行初始化设置,包括定时器 T0、A/D 转换模块、无线发射模块及单片机相应 I/O 的初始化等,这个过程是由 CC2530 单片机来完成的。

在模数转换结束后,单片机通过读取前一刻 A/D 转换值 $V(i)$ 和下一时刻的 A/D 转换值 $V(i+1)$,将前一刻的 A/D 转换值与下一时刻的 A/D 转换值进行比较,如果 $V(i+1)$ 大于 $V(i)$,则程序用 $V(i+1)$ 替代 $V(i)$,并使单片机重复上述采集、读取和比较过程,直到满足 $V(i+1)$ 小于或等于 $V(i)$,此时采集到的 A/D 转换值 $V(i)$ 即可认为是当前传感信号的峰值。即满足方程

$$v(i) = \max(V(i+1), V(i)) \tag{4}$$

式中 $v(i)$ ——当前传感信号的峰值

$V(i)$ —— i 时刻 A/D 转换值

$V(i+1)$ —— $i+1$ 时刻 A/D 转换值

CC2530 使峰值保持电路复位,同时控制无线发射模块将峰值 $v(i)$ 发送出去。

信号处理程序流程如图 11 所示。

4 系统性能测试

4.1 标定试验

为最终建立坚实度的模型,试验前标定人工测

量坚实度与系统测量镇压力的关系,镇压力测定方法如 1.2 节所示。标定时机具以 4 km/h 速度前进,以第 1 次直线位移传感器压缩量最大时开始记录,镇压轮每走一圈做一个标记点。

如图 12 所示,在标记点处用 SC900 型数字土壤坚实度仪 (Spectrum Technologies, Inc.) 测量土壤坚实度,同时以标记点为中心,宽 14 cm、长 18 cm 的矩形 4 个顶点上测量土壤坚实度,每点取 0 ~ 20 cm (每隔 5 cm 测一次) 的平均土壤坚实度,取这 5 个点的平均值作为标记点的土壤坚实度。标定数据如表 3 和图 13 所示,得到人工测量土壤坚实度 p 与系统测量镇压力 a 之间的拟合曲线和对应关系为

$$p = -0.000\ 1a^2 + 0.596\ 6a + 37.024\ 5 \tag{5}$$

式中 p ——人工测量土壤坚实度, kPa

a ——采集系统测量镇压力, N

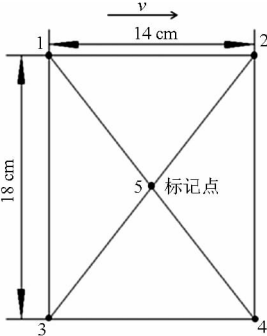


图 12 标记点土壤坚实度测量示意图

Fig. 12 Sketch map of soil compaction measurement of marker points

表 3 标定数据

Tab.3 Calibration data

项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
人工测量坚实度/kPa	309.8	337.8	362.0	393.6	414.3	443.7	485.5	491.4	503.0	515.6
系统测量镇压力/N	513.8	567.3	621.2	692.9	752.5	834.5	952.5	997.0	1 056.9	1 155.4

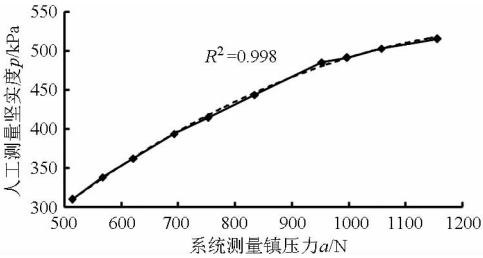


图 13 标定数据拟合图

Fig. 13 Fitting curve of calibration data

4.2 田间试验

为验证基于 ZigBee 技术的播种行表层土壤坚实度数据采集系统的性能和可靠性,在黑龙江勃利县进行了田间试验。

试验在 2015 年大豆春播期进行,试验地属于东

北黑土区,前茬作物为玉米,在前一年的秋季进行灭茬,春天土壤冻融交替时开始整地,进行行间起垄并及时镇压。试验前的土壤物理性质如表 4 所示。

表 4 试验地 0 ~ 20 cm 土壤物理性质

Tab.4 Physical properties of soil in 0 ~ 20 cm layer

参数	数值
土壤坚实度/kPa	826
土壤容积密度/(g·cm ⁻³)	1.227
土壤体积含水率/%	21.3
土壤温度/℃	13.2

试验设备:2BDB-6 型大豆变量施肥播种机、自行设计的镇压轮和本文所设计的播种行表层土壤坚实度采集系统。

测试方法:装备有直线位移传感器的镇压轮安

装在 2BDB-6 型大豆变量施肥播种机上。播种机在田间工作时,行进速度一般为 $2 \sim 6 \text{ km/h}$ ^[25-26]。因此,作业速度分别选用 1、4、7 km/h 进行试验,采用标记时取点的方法在同一速度下采集 15 点,试验测得镇压后取样深度 0~20 cm 的土壤坚实度的平均值(每隔 5 cm 测一次)。其试验数据如表 5 所示。

由表 5 可以得出,土壤播种行表层坚实度测量值与人工测量坚实度相比,相对误差平均值为 6.3%、相对误差最大值为 13.3%。系统测试过程中存在一定的误差,分析其原因主要在于数据采样点具有离散性,可以根据系统成本和监测精度要求,



图 14 田间试验

Fig. 14 Field test

通过增加采样传感器的数量降低测量误差。

用 SAS 软件对最终 3 组采集系统测量值与 SC900 型土壤坚实度仪采集的坚实度进行相关性分析,分析结果见表 6。

表 5 田间试验数据

Tab.5 Field test data

序号	速度 1 km/h			速度 4 km/h			速度 7 km/h		
	人工测量	系统测量	相对 误差/%	人工测量	系统测量	相对 误差/%	人工测量	系统测量	相对 误差/%
	坚实度/kPa	坚实度/kPa		坚实度/kPa	坚实度/kPa		坚实度/kPa	坚实度/kPa	
1	467.0	487.3	4.3	383.4	362.4	5.5	317.1	329.1	3.8
2	475.9	448.7	5.7	380.8	398.9	4.8	343.6	362.6	5.5
3	427.4	370.4	13.3	401.0	389.1	4.7	379.2	398.1	5.0
4	409.3	383.3	6.4	406.9	426.7	4.9	407.9	380.9	6.6
5	399.8	378.9	5.2	336.3	379.3	12.8	415.8	372.8	10.3
6	398.9	439.8	10.3	346.5	358.2	3.4	443.2	415.8	6.2
7	390.7	408.7	4.6	345.4	311.8	9.7	478.4	497.7	4.0
8	375.5	353.5	5.9	445.6	393.6	11.7	498.3	506.7	1.7
9	350.7	332.9	5.1	426.2	443.3	4.0	506.5	535.5	5.7
10	347.6	328.1	5.6	480.0	453.4	5.6	522.2	489.2	6.3
11	380.1	399.8	5.2	469.6	489.6	4.3	403.6	457.1	13.3
12	399.0	422.2	5.8	395.8	417.2	5.4	359.9	396.6	10.2
13	366.3	384.4	4.9	407.0	429.1	5.4	368.1	339.2	7.9
14	346.2	323.6	6.5	423.3	396.3	6.4	319.3	335.3	5.0
15	344.1	325.2	5.5	424.7	445.8	5.0	358.7	340.2	5.2

表 6 田间试验数据相关性分析

Tab.6 Correlation analysis of field test data

速度/(km·h ⁻¹)	变量	均值/kPa	标准偏差/kPa	最小值/kPa	最大值/kPa	相关系数	P 值
1	人工测量	391.894 8	40.982 5	344.1	475.87	0.836 9	0.000 1
	系统测量	385.796 7	49.4435	323.6	487.30		
4	人工测量	404.837 2	42.655 4	336.3	480.05	0.800 9	0.000 4
	系统测量	405.846 7	44.673 4	311.8	489.60		
7	人工测量	408.118 9	67.942 2	317.1	522.25	0.909 0	<0.000 1
	系统测量	410.453 3	69.755 8	329.1	535.50		

3 组采集系统测量值与 SC900 型土壤坚实度仪采集的坚实度的相关系数分别为 0.836 9、0.800 9、0.909 0,具有显著相关性(P 值分别为 0.000 1、0.000 4、 $<0.000 1$,均小于 0.01)^[7]。测量结果表明采集系统测量土壤坚实度的重现性良好,两者相关度较高,也说明所得坚实度和建立的标定方程都是可靠的。但个别数据点与 SC900 型土壤坚实度

仪测得值差异较大。其原因在于播种行表层存在土块或凹坑,使得采集系统在工作过程中镇压轮高度发生突变,进而引起弹簧伸缩量发生突变,导致系统测得的数据产生跳跃。

5 结论

(1) 基于 ZigBee 技术设计了土壤坚实度无线

采集系统,以直线位移传感器监测轮辐伸缩量,根据土壤坚实度数学模型得到土壤坚实度信息,通过安装在镇压轮上的子节点将信息传送给主节点,为镇压机构和仿形机构的参数改进提供依据,为农田坚实度信息后期管理与分析提供技术支持。

(2) 通过试验得出镇压力与直线位移传感器的压缩位移量之间的关系,以及土壤坚实度与镇压力之间的拟合曲线,在此基础上构建了轮辐伸缩量与

土壤坚实度之间的数学模型。

(3) 田间试验结果表明,针对播种行表层土壤坚实度的相对误差平均值为 6.3%,相对误差最大值为 13.3%,坚实度测量值与真实值的相关系数分别为 0.836 9、0.800 9、0.909 0,具有显著相关性。因此,该采集系统可较好地测量播种行表层土壤坚实度。

参 考 文 献

1 Berti M T, Johnson B L, Henson R A. Seeding depth and soil packing affect pure live seed emergence of cuphea[J]. Industrial Crops and Products,2008,27(3):272-278.

2 Pierce F J, Elliott T V. Regional and on-farm wireless sensor networks for agricultural systems in Eastern Washington[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 61(4): 32-43.

3 Xiao Kehui, Xiao Deqin, Luo Xiwen. Smart water-saving irrigation system in precision agriculture based on wireless sensor network[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11):170-175.

4 Liu W, Tollenaar M, Stewart G, et al. Response of corn grain yield to spatial and temporal variability in emergence[J]. Crop Science, 2004, 44(3):847-854.

5 Ichiro I, Hiroshi M, Takeshi S, et al. Study on improving the emergence of direct sowing sugar beets (part 1)—improving emergence rate by press roller attached to seeder[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery,2006,68(6):75-82.

6 贾洪雷,王文君,庄健,等. 仿形弹性镇压辊减粘防滑结构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015,46(6):20-27

Jia Honglei, Wang Wenjun, Zhuang Jian, et al. Design and experiment on reducing soil adhesion and anti slip structure of profiling elastic press roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(6):20-27. (in Chinese)

7 张淑娟,裴正军,王凤花,等. 农田土壤含水率和坚实度采集仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9):75-79.

Zhang Shujuan, Qiu Zhengjun, Wang Fenghua, et al. Design and test on the field soil moisture and compaction acquisition instrument[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010, 41(9):75-79. (in Chinese)

8 顾耀权,贾洪雷,郭慧,等. 滑刀式开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2):38-42.

Gu Yaoquan, Jia Honglei, Guo Hui, et al. Design and experiment of sliding knife furrow opener[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2):38-42. (in Chinese)

9 贾洪雷,汲文峰,韩伟峰,等. 旋耕—碎茬通用刀片结构参数优化试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(7):45-50.

Jia Honglei, Ji Wenfeng, Han Weifeng, et al. Optimization experiment of structure parameters of rototilling and stubble breaking universal blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7):45-50. (in Chinese)

10 朱兆龙,孙宇瑞,马道坤,等. 一种土壤剖面水分与坚实度同步测量装置[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2007,28(4):280-283.

Zhu Zhaolong, Sun Yurui, Ma Daokun, et al. An instrument for simultaneous measurement of soil water content and compaction[J]. Journal of Jiangsu University:Natural Science Edition, 2007, 28(4): 280-283. (in Chinese)

11 邵玲,林剑辉,孙宇瑞. 农田土壤含水率与坚实度快速信息采集系统[J]. 农机化研究, 2007, 29(2): 83-86.

Shao Ling, Lin Jianhui, Sun Yurui. Quick measuring system for soil water content and soil hardness [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(2): 83-86. (in Chinese)

12 贾洪雷,王文君,庄健,等. 仿形弹性镇压辊设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(6):28-34,83.

Jia Honglei, Wang Wenjun, Zhuang Jian, et al. Design and experiment of profiling elastic press roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(6):28-34,83. (in Chinese)

13 汤安宁,吴才聪,郑立华,等. 农业移动终端无线数据传输技术[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):244-247.

Tang Anning, Wu Caicong, Zheng Lihua, et al. Wireless data transmission technology for mobile agriculture terminal[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(Supp.):244-247. (in Chinese)

14 黄晓鹏,田斌,万芳新,等. 基于蓝牙的北方沼气加热温室控制系统设计[J]. 农业机械学报,2008,39(3):191-194.

15 韩文霆,吴普特,郁晓庆,等. 农业环境信息无线传感器网络监测技术研究进展[J]. 农业工程学报,2011,27(14):326-330.

Han Wenting, Wu Pute, Yu Xiaoqing, et al. Research progress in wireless sensor network for agricultural environment monitoring[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(14): 326-330. (in Chinese)

- Li Yongchong, Yan Haijun, Xu Chengbo, et al. Simulation of sprinkler water distribution with droplet dynamics and evaporation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 127 – 132. (in Chinese)
- 12 刘海军, 龚时宏. 喷灌水滴的蒸发研究[J]. 节水灌溉, 2000(2): 16 – 19.
Liu Haijun, Gong Shihong. Study on evaporation of sprinkler droplets[J]. Water Saving Irrigation, 2000(2): 16 – 19. (in Chinese)
- 13 Sadeghi S H, Peters T R, Amini M Z, et al. Novel approach to evaluate the dynamic variation of wind drift and evaporation losses under moving irrigation systems[J]. Biosystems Engineering, 2015, 135: 44 – 53.
- 14 张志宇, 侯晓宇, 侯国恩. 由室内试验资料推求有风条件下的喷灌均匀度[J]. 河北农业大学学报, 2013(4): 136 – 141.
Zhang Zhiyu, Hou Xiaoyu, Hou Guoen. The uniformity calculation of sprinkler irrigation under wind condition using indoor experimental data[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2013(4): 136 – 141. (in Chinese)
- 15 De Lima J, Torfs P, Singh V P. A mathematical model for evaluating the effect of wind on downward-spraying rainfall simulators [J]. Catena, 2002, 46(4): 221 – 241.
- 16 Seginer I, Nir D, Bernuth R D. Simulation of wind-distorted sprinkler patterns [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1991, 117(2): 285 – 306.
- 17 Vories E D, Von Bernuth R D, Mickelson R H. Simulating sprinkler performance in wind[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1987, 113(1): 119 – 130.
- 18 Burillo G S, Delirhasannia R, Playán E, et al. Initial drop velocity in a fixed spray plate sprinkler[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2013, 139(7): 521 – 531.
- 19 Ouazaa S, Burguete J, Paniagua M P, et al. Simulating water distribution patterns for fixed spray plate sprinkler using the ballistic theory[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2014, 12(3): 850 – 863.
- 20 Kincaid D C. Application rates from center pivot irrigation with current sprinkler types[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005, 21(4): 605 – 610.
- 21 Sayyadi H, Nazemi A H, Sadraddini A A, et al. Characterising droplets and precipitation profiles of a fixed spray-plate sprinkler [J]. Biosystems Engineering, 2014, 119: 13 – 24.
- 22 Kruger A, Witold F Krajewski. Tow-dimensional video disdrometer: a description[J]. Journal of Antmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(5): 602 – 617.
- 23 巩兴晖, 朱德兰, 张林, 等. 基于 2DVD 的非旋转折射式喷头水滴直径分布规律[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 128 – 133.
Gong Xinghui, Zhu Delan, Zhang Lin, et al. Drop size distribution of fixed spray-plate sprinklers with two-dimensional video disdrometer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 128 – 133. (in Chinese)
- 24 李久生. 谈平均水滴直径的计算方法[J]. 节水灌溉, 1987(4): 21 – 23.
- 25 Christiansen J E. Irrigation by sprinkling [R]. California Agricultural Experiment Station Bulletin No 670, Davis: California University, 1942.

(上接第 46 页)

- 16 郁晓庆, 韩文霆, 吴普特, 等. 土壤不同频率无线地下传感器网络信号传播特性试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 252 – 260, 218.
Yu Xiaoqing, Han Wenting, Wu Pute, et al. Experiment of propagation characteristics based on different frequency channels of wireless underground sensor network in soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 252 – 260, 218. (in Chinese)
- 17 郭文川, 程寒杰, 李瑞明, 等. 基于无线传感器网络的温室环境信息监测系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 181 – 185.
Guo Wenchuan, Cheng Hanjie, Li Ruiming, et al. Greenhouse monitoring system based on wireless sensor networks [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 181 – 185. (in Chinese)
- 18 齐江涛, 张书慧, 于英杰, 等. 基于蓝牙技术的变量施肥机速度采集系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 200 – 204.
Qi Jiangtao, Zhang Shuhui, Yu Yingjie, et al. Development of a ground speed collecting system for the variable rate fertilizer machine based on bluetooth [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 200 – 204. (in Chinese)
- 19 吉林大学. 一种具有镇压力监测功能的镇压轮. 中国, 201410177715.4[P]. 2014 – 08 – 06.
- 20 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- 21 王万钧, 胡中. 农业机械设计手册: 上册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- 22 张艳阳. 基于 ZigBee 的中央空调末端监控系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- 23 Geer D. Users make a beeline for Zigbee technology[J]. IEEE Computer Society Press, 2005, 38(12): 16 – 19.
- 24 瞿雷, 刘盛德, 胡咸斌. ZigBee 技术及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- 25 贾洪雷, 王刚, 王玉, 等. 2BH – 3 型行间播种机设计与试验[C]//2012 中国农业机械学会国际学术年会论文集. 2012.
- 26 赵佳乐, 贾洪雷, 姜鑫铭, 等. 大豆播种机偏置双圆盘气吸式排种器[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 78 – 83.
Zhao Jiale, Jia Honglei, Jiang Xinming, et al. Suction type offset double disc seed metering device of soybean seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 78 – 83. (in Chinese)