

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.002

精密播种机下压力和播深 CAN 总线监控与评价系统研究

高原源¹ 翟长远² 杨 硕^{1,2} 赵学观² 王 秀^{2,3} 赵春江^{1,3}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097;
3. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要:为实现精密播种作业中播种下压力和播深的实时监控和质量评价,设计了一种多行播种机下压力和播深 CAN 总线监控与评价系统。系统采用基于角度和轴销传感器的播深和下压力测量装置,优化设计了液压驱动和分区控制的气压驱动装置,开发了基于 CoDeSys(Controlled development system)编程环境的智能终端交互界面和 ECU (Electronic control unit)控制程序,实现了基于 CAN 总线通信的作业参数监测控制和质量评价。通过搭建的室内试验台完成了播深和下压力静态建模试验,建立了适应不同设定播深的下压力测量模型。分区控制系统响应测试试验表明,在调节范围(0.2~0.6 MPa)内,系统超调量低于 5.97%;响应时间与控制行数和设定气压正相关;在设定气压(0.1~0.6 MPa)范围内,6 行播种机调节时间不超过 2.35 s。为测试系统工作性能,在 25、50、75 mm 3 种设定播深下,对左区控制(600 N)、右区控制(300 N)、机械调节和自重调节 4 种控制方式进行了田间性能试验。土壤压实和播种下压力控制效果试验表明,主动分区控制方式可实现更为稳定的土壤紧实度,且在浅旋地块环境下,右区控制方式可达到最优的下压力稳定性,其控制合格率不小于 95.78%;播深控制效果试验表明,随着设定播深的增大,播深质量显著降低,在设定播深 25~75 mm 范围内,左区控制、右区控制、机械调节和自重调节对应的最小播深合格率分别为 91.92%、92.53%、70.44% 和 58.72%,对应的最大标准差分别为 2.22、3.11、3.69、7.70 mm,对应的最大变异系数分别为 3.52%、4.40%、4.96% 和 14.01%。相比机械调节和自重调节,分区控制系统提高了单体下压力和播深稳定性。

关键词:精密播种机;下压力;播种深度;监测控制;质量评价;CAN 总线

中图分类号: S24; S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)06-0015-14

OSID:



Development of CAN-based Downforce and Sowing Depth Monitoring and Evaluation System for Precision Planter

GAO Yuanyuan¹ ZHAI Changyuan² YANG Shuo^{1,2} ZHAO Xueguan² WANG Xiu^{2,3} ZHAO Chunjiang^{1,3}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

3. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: The adequate seeding downforce and consistent sowing depth are beneficial to improve the seedling quality in the precision planting operation. To avoid the problems of undesired soil compaction and uneven germination caused by the change of soil conditions, and realize the intelligent monitoring and evaluation of the sowing quality, the design of a downforce and sowing depth monitoring and evaluation system was presented for the multi row-crop planter. The system was mainly composed of downforce measurement device, sowing depth measurement device, electronic control unit (ECU) for data acquisition and actuator control, GNSS receiver, intelligent terminal and pneumatic driving device. The downforce and sowing depth measurement devices were applied to measure the downforce acting on the gauge wheels and the sowing depth based on the axle pin sensor and the angle sensor of limit shank respectively. The pneumatic driving device was used to provide the necessary downforce, which mainly included air-spring, gas generator, electric-gas proportional valve and gas tank. In order to quickly

收稿日期: 2020-02-14 修回日期: 2020-03-10
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700502)
作者简介: 高原源(1989—),男,博士生,主要从事精密播种技术研究,E-mail: gaoyy0910@foxmail.com
通信作者: 王秀(1965—),男,研究员,主要从事智能农机装备技术研究,E-mail: wangx@nrcita.org.cn

replenish the air loss caused by the rapid regulation of downforce and improve the response speed of the system, a section control method for the pneumatic driving device was adopted, and the gas generator with a double cylinder air pump was driven by a hydraulic motor. In addition, a human machine interface (HMI) of the intelligent terminal and the control program of ECU were developed based on controlled development system (CoDeSys) programming environment to realize the real-time monitoring and evaluation of seeding quality through CAN bus communication. To improve the accuracy of measurement, the static modeling tests of sowing depth and downforce were conducted on an indoor test platform and a downforce measurement model integrating sowing depth variable was established. The response characteristic test of the control system showed that the step response overshoot was less than 5.97%, and the adjustment time was positively related to the control row-unit number and the set air pressure in the range of 0.1~0.6 MPa, which was not more than 2.35 s for the six row-units planter. Furthermore, in order to test the performance of the system, field performance experiments were carried out with four control modes (left section control with 600 N target downforce, right section control with 300 N target downforce, mechanical adjustment with helical spring and dead weight adjustment of row-unit) and three setting sowing depths (25 mm, 50 mm and 75 mm). The experiment of soil compaction and sowing downforce control showed that the section control method could achieve more stable soil compactness, and the right section control method could achieve the optimal downforce stability in the shallow rotary tillage filed with no less than 95.78% qualified rate. The experiment of sowing depth control effect showed that the quality of sowing depth was decreased significantly with the increase of setting sowing depth. In the depth range of 25~75 mm, the minimum qualified rates of left section control, right section control, mechanical adjustment and dead weight adjustment were 91.92%, 92.53%, 70.44% and 58.72%, the corresponding maximum standard deviations (SD) were 2.22 mm, 3.11 mm, 3.69 mm and 7.70 mm, and the corresponding maximum coefficients of variation (CV) were 3.52%, 4.40%, 4.96% and 14.01%, respectively. The above results showed that the system with section control method could improve the consistency of sowing depth and accuracy of downforce, and had better performance of sowing depth and downforce control than the system with mechanical adjustment and dead weight adjustment methods.

Key words: precision planter; downforce; sowing depth; monitoring and control; quality evaluation; CAN bus

0 引言

精密播种技术是将定量的良种按照农艺要求的行距、株距和播种深度(播深)进行穴播和种肥深施的机械化播种技术^[1],因其节本增效的突出优势而得到了高度重视和广泛应用^[2-3]。精密播种机是实现精密播种的关键,其播种粒距均匀性和播深稳定性直接影响出苗质量和最终作物产量^[4]。随着农业信息技术的发展,播种作业参数的智能化监控与评价已成为提高播种质量的重要手段。

在播种质量监控评价方面,国外农机企业研究较早,已实现不同作业参数的实时监控,如 John Deere 公司研发的 TruSet 耕作技术^[5],调节时间不超过 6 s,可根据驾驶室终端处方图自动调整作业深度和下压力,以提高耕作窗口期作业效率。Ag Leader 公司研发了 InCommand 系统^[6],可对播种量、粒距等指标进行监测和评价,搭配 SureForce 技术也可实时调整单体对地下压力。此外, Kinze 公司开发了 True Depth 下压力控制系统和 Blue

Vantage 远程监控系统^[7], Precision Planting 公司开发了 SeederForce 下压力控制系统和 20/20 SeedSense 终端监测系统^[8]。国内相关研究多侧重于对播种粒距的监控评价和播种深度的监控上,已实现了播种机的高速精量播种^[9-11]、排种质量监测^[12-14]、播深实时测量与控制^[15-17]。随着保护性耕作技术的推广,地表起伏和残茬覆盖等复杂工况对播深和下压力控制性能提出了更高要求。研究表明,适宜的播种下压力不仅可以提高播深稳定性,还可避免种沟过度压实,从而提高种子墒情和作物产量^[18-20]。为减小土壤区间阻力变化对播深的影响,文献[21]通过检测开沟压力来调节仿形机构对地压力,以保证稳定一致的开沟深度;文献[22]提出了基于压电薄膜的限深轮测力方式,通过调节四连杆上气囊压力来控制播深;文献[23-24]设计了播种单体下压力控制系统,以提高复杂工况下的播深稳定性。

分析发现,国外监控系统涵盖粒距、播深和下压力等多方面质量参数,其功能复杂,对驾驶员操作技

能和拖拉机设备通信要求较高,且需搭配相应配件方可使用,价格昂贵。国内除播种粒距研究之外虽已开展了下压力监控方面的研究,但均以播种单体试验为主,且主要用于播深控制,缺少整机系统研究及下压力自身作业效果的监测评价。文献[25]试验发现,设定播深和下压力均影响实际播种深度。因此,单独下压力或播深的监控已无法满足精密播种需求,实现两者一体化的实时监控与现场评价将更有助于提高播种质量。随着播种机功能的扩展,现有系统多采用的点对点单一通信方式的信号利用率低,多路通信时布线繁杂,且不易扩展^[26]。作为农机装备应用最广泛的通信方式之一^[27],基于 ISO 11783 协议标准的控制局域网 (Controller area network, CAN) 现场总线技术具有高可靠性、实时性和灵活性等优点,开发相应的总线控制系统已成为

农机装备智能化研究的热点^[28]。

本文在前期研究基础上,设计一种基于 CAN 总线的播种机下压力和播深监控平台与质量评价系统,采用基于角度和轴销传感器的播深和下压力测量装置,优化设计气压驱动装置,以减小气量损失、提高系统响应速度,开发基于 CoDeSys 编程环境的智能终端交互界面和 ECU 控制程序,以期实现播深和下压力的监测控制和质量评价,提高多行播种机系统控制性能和智能化水平。

1 系统设计

1.1 系统组成和工作原理

如图 1 所示,下压力和播深监控与评价系统主要由下压力测量装置、播深测量装置、机具 ECU、GNSS 传感器、智能终端和气压驱动装置组成。

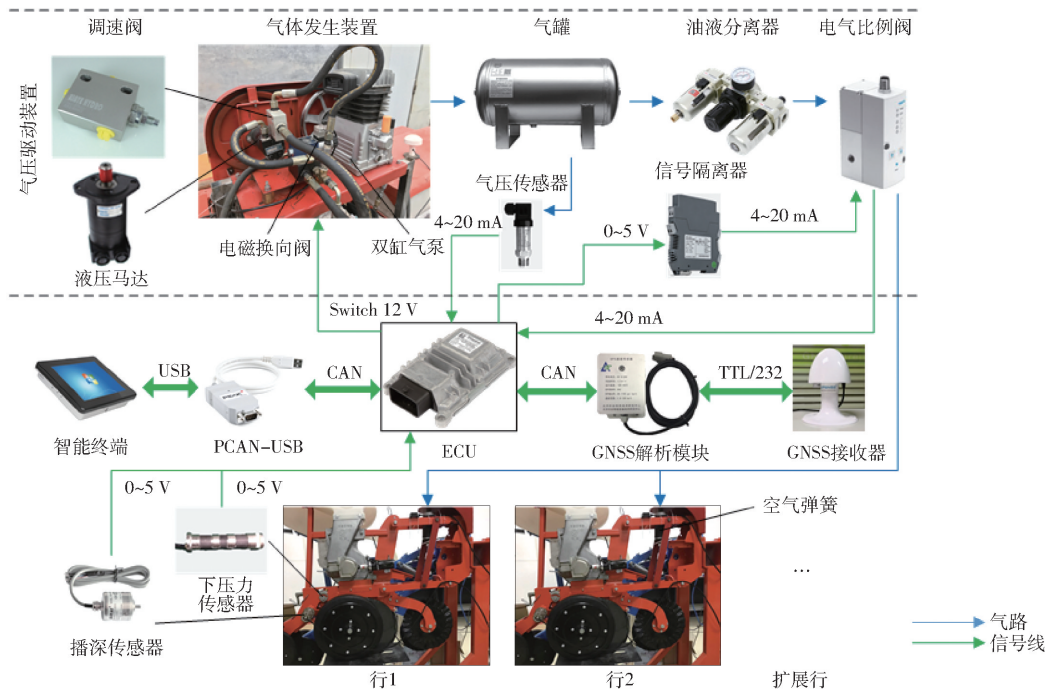


图 1 系统组成

Fig. 1 System components

其中,ECU 为 HY - TTC32 型集成控制器,搭载的多路自由配置 I/O 接口可满足系统传感器数据采集和执行器控制需求;GNSS 传感器、下压力 and 播深测量装置用于实时检测作业过程中包括播种机速度、位置、下压力和播深等信息,并反馈给 ECU 来控制气压驱动装置调节播种机对地下压力,提高播深稳定性;智能终端自带多个 RS232 和 USB 通信接口,搭配 PCAN - USB 转换器与 ECU 总线通信,运行基于 CoDeSys Visualizations 开发的人机交互界面,可实现播种作业参数的设置、作业信息的实时监测和作业效果的在线评价。通过该系统可实时调节播种单体对地下压力,同时监测播深和下压力作业效

果,实现对作业区域播深稳定性和下压力一致性的控制,在提高播深稳定性基础上,避免种沟侧壁压实,促进种子生长发育。

1.2 硬件设计

1.2.1 下压力和播深测量装置

由于单体限深轮直接接触并压实土壤,其对地作用力和相对开沟器位置可直接反映播种下压力和播深。前期通过对限深轮的力学分析和数学模型研究,发现播深和下压力之间存在交互作用,即地表起伏等情况会造成播深和下压力同时变化^[29]。为提高质量评价完整性和准确性,本系统优先采用基于限深轮的下压力和播深同步测量方式。

下压力测量装置用于测量作业地面与限深轮之间相互作用力,并反馈给 ECU 来控制气压驱动装置,实时调整对地下压力,包括轴销传感器和压力变送器,相关参数设计可见文献[29],此处不再叙述。如图 2a 所示,轴销传感器(ZHGX-N18 型,蚌埠众城传感器有限公司)通过替换单体原有限深销轴来实时监测限深轮作用下的轴销形变量,量程为 6 000 N,而压力变送器用于将轴销传感器信号放大,变换为 0~5 V 模拟信号。

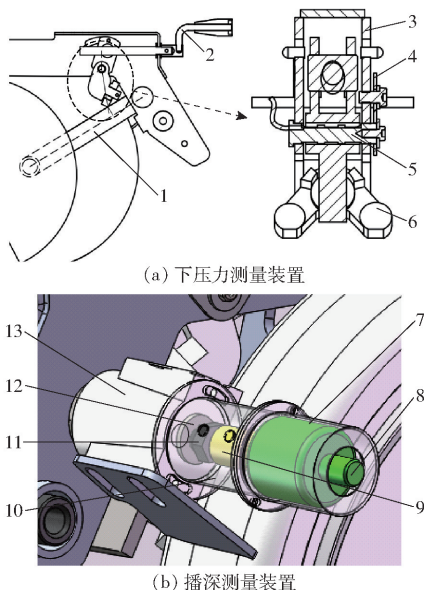


图 2 下压力与播深测量装置

Fig. 2 Downforce and sowing depth measurement devices

1、13. 限深臂 2. 播深调节机构 3. 机架 4. 传感器固定片
5. 轴销传感器 6. 限深块 7. 传感器保护套 8. 角度传感器
9. 联轴器 10. 联轴器套 11. 连接螺栓 12. 摆臂销轴

如图 2b 所示,播深测量装置通过角度传感器所测限深臂摆动角来计算单体开沟深度,可实现作业过程中播深的实时监测和评价,具体结构设计参见文献[30],其中,角度传感器(WOA-H-90-V1 型,深圳市米朗科技有限公司)量程为 90°,0~5 V 模拟电压输出。此外,前期研究发现,不同播深设置对下压力测量准确性影响较大,因此本系统融合下压力测量装置和播深测量装置,通过测定作业前的设定播深来校正下压力测量模型,以提高不同设定播深时下压力监控准确性。

1.2.2 GNSS 传感器

GNSS 传感器包括接收器和解析模块,用于获取机具实时位置和行进速度。其中,接收器为深圳市世导通电子科技有限公司所产 RS232 型 GNSS 接收器,采样频率为 1 Hz;解析模块采用 STM32 控制板,主控芯片为 ATM32F105R8T6,用于对 GNSS 接收器所传数据进行解析和拆分,集成的 bxCAN (Basic extended CAN) 接口可实现与 ECU 总线通

信,通信协议见文献[30]。作业过程中,接收器根据 NMEA-0183 协议标准,将采样数据通过 TTL/232 模块上传给解析模块,解析模块根据所需参数信息优先选取推荐最小定位信息(Recommended minimum specific GPS/TRANSIT data,RMC)协议语句,并根据其格式定义解析获得机具经纬度和速度等信息。所选协议语句格式为“\$GPRMC,024813.640,A,3158.4608,N,11848.3737,E,10.05,324.27,150706,.,A*50”。

每条语句中不同定义字段通过“,”进行分隔,其中,字段 1 为 UTC 时间,hhmmss.sss 格式,在其上加 8 h 可转换为北京时间;字段 2 为状态,A 为定位,V 为未定位;字段 3 为纬度(ddmm.mmmm),度分格式(前导位数不足则补 0);字段 4 为纬度 N(北纬)或 S(南纬);字段 5 为经度(dddmm.mmmm),度分格式(前导位数不足则补 0);字段 6 为经度 E(东经)或 W(西经);字段 7 为速度,单位节,乘以 1.852 可换算为 km/h;字段 8 为方位角,(°);字段 9 为 UTC 日期,DDMMYY 格式,如 UTC 时间加 8 后大于 24,则日期应加 1;字段 10 为磁偏角(0°~180°)(前导位数不足则补 0);字段 11 为磁偏角方向,E 为东,W 为西;字段 16 为校验值。

1.2.3 气压驱动装置

为实现整机气动式下压力调节,本文对前期单体气压驱动装置^[24]进行了优化设计,以适应整机气压驱动需求,包括气囊、电气比例阀、气体发生器、气罐、油液分离器等。气体发生器所产空气经单向阀进入气罐,压缩获得所需高压空气。设定气罐安全气压为 0.7 MPa,并安装压力传感器实时监测反馈给 ECU,进而控制气体发生器启停以保证气罐安全。气囊安装在单体四连杆仿形机构上,其内部气压可通过电气比例阀(VPPM 型,FESTO 公司)进行调节,从而改变作用在四连杆上压力。由于 ECU 只能输出模拟电压信号,为此采用信号隔离器(MIK-402Y-1-3-2-1-1 型,杭州米科传感器技术有限公司)将电气比例阀控制信号从 0~5 V 转变为 4~20 mA,同时采集比例阀输出口压力,实现设定压力的 PID 控制。考虑播种机作业区域内土壤质地差异性和比例阀自身特性,装置将 6 行播种机等分为左右 3 行区域,并分别采用 1 个比例阀进行单独分区控制,以期提高系统控制精度和响应速度。

实际作业中,土壤阻力的变化会造成气囊压力的较大波动,高压空气的快速充放对气体发生装置性能提出更高要求。为此,一方面增大气体容量,采用双气罐设计;另一方面增大气体流量,优化设计液压驱动式气体发生器,包括电磁换向阀、调速阀

调节气囊内部气压,保证实时下压力在设定阈值范围内。对分区控制方式而言,实时下压力为行间下压力平均值,同时根据后续试验结果设置气囊初始压力为 0.4 MPa 以提高系统响应速度。此外,数据发送部分根据界面“数据存储”开关状态来进行数据的实时发送,借助 CAN 总线分析仪以实现数据的存储,有利于后续绘制相关田间作业信息图。

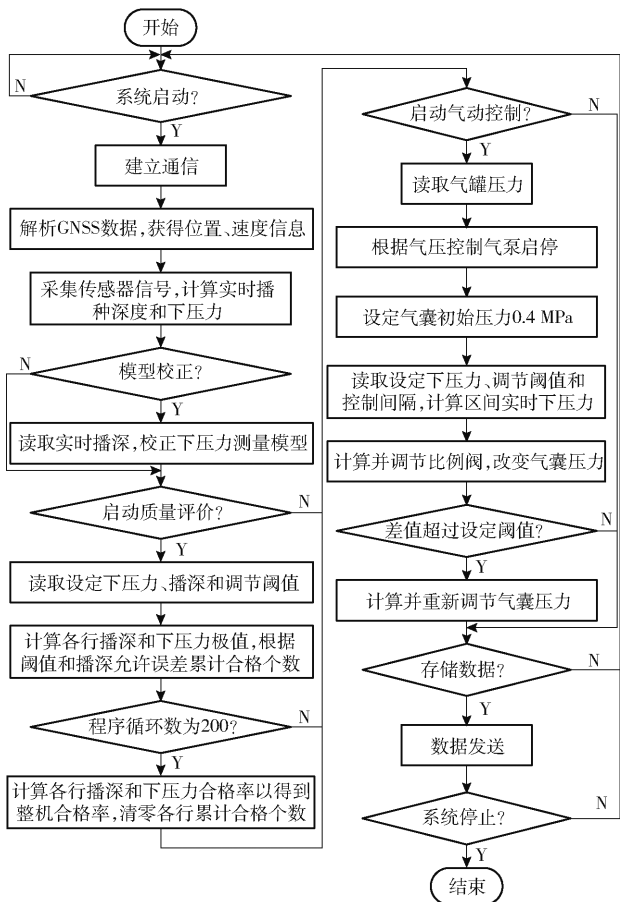


图5 程序控制流程图

Fig. 5 Flow chart of control program

2 播深和下压力测量模型建立

如图6所示,搭建试验台进行室内建模试验,包括播深和下压力传感器标定和建模试验。由于6行播种单体结构一致,传感器校正过程相同,本文仅对



图6 室内试验台

Fig. 6 Indoor test bench

1. 下压力测量装置 2. 播深调节杆 3. 播深测量装置 4. 电子秤

其中一个单体试验过程进行叙述。

2.1 播种深度测量模型

调节图6所示播深调节杆,改变不同播深,以此建立单体播深与传感器反馈值拟合模型。对本装置而言,实际播深可通过游标卡尺测量限深轮与开沟器之间相对位置差获得,播深传感器反馈值可由 USB-6002 型数据采集卡(美国国家仪器有限公司)测得。每种播深设定下,重复测量 3 次,取其平均值为实际播深和反馈值,建立传感器角度和深度测量模型为

$$\theta = 0.018U - 36.27 \quad (1)$$

$$H = 142.35 - 3.806\theta \quad (2)$$

式中 U ——角度传感器输出, mV

θ ——限深轮摆臂与机架夹角, ($^{\circ}$)

H ——播种深度, mm

2.2 下压力测量模型

前期研究发现,不同播深设定下,同样压力作用下得到的下压力传感器反馈值差异较大。在上述播深标定基础上,根据播深和下压力调节范围,在不同播深设定下,对单体施加不同压力,记录播深传感器测量值、下压力传感器测量值,以及实际下压力。其中,实际下压力可通过单体下方电子秤测得(图6),传感器反馈值同样可由数据采集卡测得。基于多项式逼近拟合方式,最终建立实际下压力监测模型方程为

$$f_A = 1715 + 1.17f_s - 7569\gamma - 0.9616f_s\gamma + 7321\gamma^2 \quad (3)$$

其中 $\gamma = \pi\theta/180$

式中 f_A ——实际播种下压力, N

f_s ——轴销传感器压力检测值, N

γ ——限深臂角度测量值, rad

同理,将式(2)代入式(3)可得融合播深的下压力测量模型

$$f_A = 0.54f_s - 9.12H - 0.0044f_sH + 0.15H^2 - 106.26 \quad (4)$$

对不同单体,根据式(4)模型,在测得播深和检测下压力基础上可计算得到各单体行实际播种下压力。

3 控制系统响应测试试验

3.1 试验方法

作为下压力和播深控制系统主要执行部件,气囊的充放特性关系系统整体响应性能。为避免下压力调节不及时而影响播深稳定性,有必要对气囊阶跃响应时间进行测试,以保证设定下压力调节周期大于气囊响应时间。文献[24]已对单行气囊响应

特性进行了研究,由于多行播种机气囊串联对气量的需求更大,而分区控制方式造成的气量分配也影响着系统响应时间。为此,试验将分别研究不同设定压力值和分区控制气囊个数(即播种行数)对系统响应性能影响。

首先,在0.1~0.6 MPa气压范围内选取6个压力设定值,对分区控制下的6行气囊进行充气测试,并通过ECU实时采集气囊内部气压,其中比例阀1控制左区(1~3行),比例阀2控制右区(4~6行),区间内气囊相互串联。然后,在上述分区控制基础上,分别对两气囊(左1右1)、三气囊(左2右1)、四气囊(左2右2)和五气囊(左3右2)进行0.6 MPa充气阶跃响应测试。根据气囊压力传感器特性,设置采样频率为20 Hz,采用USBCAN分析仪(USBCAN-E-U型,广州致远电子有限公司)和自带软件进行ECU报文数据的传输和存储。其中,采

样时间为10s,采样数据200个,利用Excel和Matlab软件对数据进行处理,获得系统主要响应特性参数,包括响应超调量(σ_p)和调节时间(T_s)。其中,调节时间为达到稳态值5%误差范围内所需时间。超调量计算式为

$$\sigma_p = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\%$$

(5)

式中 t_p ——峰值时间,s
 $y(t_p)$ ——峰值,MPa
 $y(\infty)$ ——稳态值,MPa

3.2 结果分析

不同设定气压下分区控制系统响应试验结果如图7所示。可以看出,左右区控制响应特性曲线基本吻合,说明在控制行数相同情况下,左右区控制响应性能一致,相比整体控制,分区控制方法可显著缩短整机响应时间,提高控制性能。

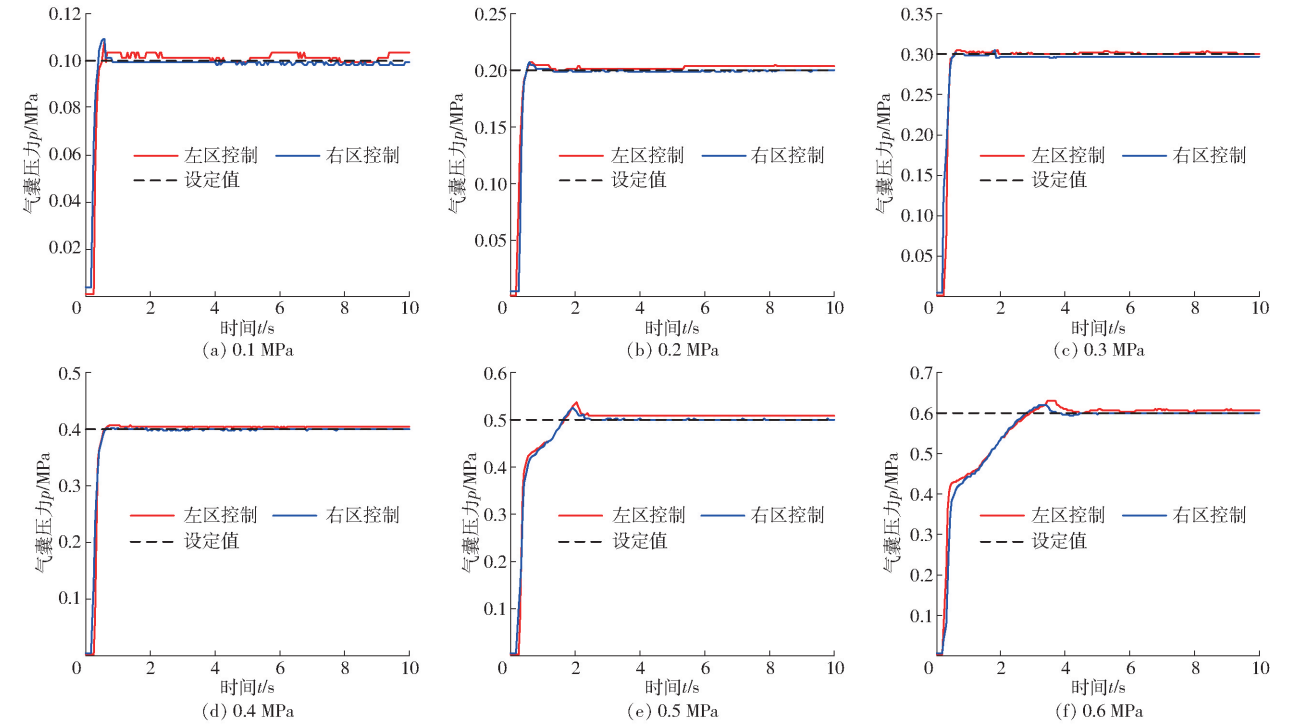


图7 不同阶跃压力下分区控制系统响应曲线

Fig. 7 Response curves of section control system under different step pressures

比较左右区响应曲线发现,除0.5 MPa设定气压外,左区控制稳态误差在0.001~0.004 MPa,右区控制稳态误差在0.001~0.002 MPa,在分区控制PID参数相同情况下,其稳定性的差异可能来源于2个比例阀对同一控制参数存在的响应差异,由于2种控制方式稳态误差差值较小,可以认为其稳定性基本相同。而在0.1 MPa设定压力下左区控制出现较为频繁的振荡,原因在于播种机摆放位置的不平,造成左右区气囊初始气压不同,在低气压设定下,气路原有气压差异影响了阀的响应性能。同时,当设

定压力为0.1~0.4 MPa时,系统整体响应速度较快,当压力超过0.4 MPa后,系统响应速度显著变慢,反映在图7e和图7f上即可看出曲线斜率逐渐变小,原因在于随着气囊内部压力的增大,高压空气进入的速度变慢,影响了装置性能。为提高系统响应速度,建议后续控制以0.4 MPa为初始设定压力,对前期耕作处理的地块,当0.4 MPa以下气囊压力满足其作业需求时,系统控制响应时间也可进一步减小。

对数据进行处理分析,结果如表1所示。可以

看出,在调节范围 0.2 ~ 0.6 MPa 内,左右区控制超调量均低于 5.97%,且右区控制超调量不超过 4.81%。对调节时间而言,其与设定气压大小正相关,在设定气压 0.1 ~ 0.4 MPa 下,左区控制最长为 0.30 s,右区控制最长为 0.35 s,当气压超过 0.4 MPa,左区控制为 1.25 ~ 2.30 s,右区控制为 1.25 ~ 2.25 s,由于传感器采样最小时间间隔为 0.05 s,默认左右区控制调节时间一致,即分区控制下系统整体响应时间不超过 2.30 s,据此设定程序控制间隔为 3 s。

表 1 不同阶跃压力下分区控制系统响应试验结果

Tab.1 Response results of section control system under different step pressures

气压 p/MPa	峰值		稳态值		超调量		调节时间	
	$y(t_p)/\text{MPa}$		$y(\infty)/\text{MPa}$		$\sigma_p/\%$		T_s/s	
	左区 控制	右区 控制	左区 控制	右区 控制	左区 控制	右区 控制	左区 控制	右区 控制
0.1	0.108	0.109	0.101	0.099	6.93	10.10	0.25	0.20
0.2	0.206	0.206	0.201	0.198	5.97	4.04	0.25	0.30
0.3	0.304	0.304	0.301	0.298	1.00	2.70	0.25	0.30
0.4	0.406	0.401	0.404	0.399	0.99	1.26	0.30	0.35
0.5	0.535	0.523	0.506	0.499	5.73	4.81	1.25	1.25
0.6	0.630	0.620	0.604	0.598	4.30	3.68	2.30	2.25

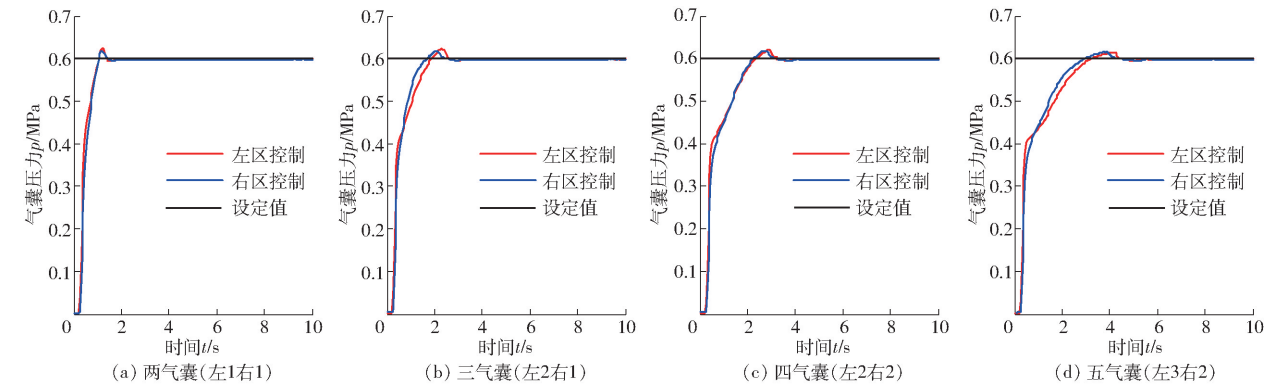


图 8 不同分区控制方式下系统响应曲线

Fig.8 System response curves in different section control modes

表 2 不同分区控制方式下系统响应试验结果

Tab.2 System response results in different section control modes

行数 n	峰值		稳态值		超调量		调节时间	
	$y(t_p)/\text{MPa}$		$y(\infty)/\text{MPa}$		$\sigma_p/\%$		T_s/s	
	左区 控制	右区 控制	左区 控制	右区 控制	左区 控制	右区 控制	左区 控制	右区 控制
2	0.625	0.618	0.598	0.598	4.48	3.34	0.75	0.75
3	0.623	0.618	0.598	0.598	4.20	3.34	1.40	1.10
4	0.620	0.618	0.598	0.598	3.64	3.34	1.75	1.70
5	0.615	0.616	0.598	0.598	2.78	3.06	2.35	2.05

不同分区控制行数下系统响应测试结果如图 8 所示。在 0.6 MPa 阶跃气压调节下,对左右区控制而言,随着控制行数的增加,其调节时间均变大。当左右区控制行数不等时,控制行数越多,其响应调节时间越长,且在 0.4 MPa 压力之前两者区别不大(图 8b、8d);当左右区控制行数相同时,左右区控制调节时间基本相等(图 8a、8c、7f)。

分析表 2 数据发现,在左右区分别控制单个播种行的情况下,其调节时间最小为 0.75 s,而随控制行数的增加,调节时间最长为 2.35 s,因此,当播种机单体行较多时,为提高响应速度,可在现有系统基础上通过增加电气比例阀以实现各播种行的单独控制。对 6 行播种机而言,综合考虑硬件成本和地块土壤区间差异下的控制精度需求,本系统选择 3 行为一区域的分区控制方式,当播种机行数大于 6 时,可根据实际单体行数来配套增加电气比例阀个数。同时,在区域控制行数不变的情况下,相邻区域控制行数的增加也会造成调节时间变大,如同样 2 行控制下的左区,随着右区控制行数从 1 行变为 2 行,其调节时间也从 1.40 s 变为 1.75 s,原因在于管路气量的区域分配延缓了系统响应速度。

4 田间性能试验

4.1 试验装置和试验方法

如图 9 所示,为检验系统实际工作性能,于 2019 年 12 月在河北省石家庄市栾城区北留营村进行田间试验。试验地块长为 220 m、宽为 12 m,试验装置为搭载本文设计系统的 2BFQ-6 型气力精密播种机(河北中友机电设备有限公司),根据其作业幅宽将试验地块分成 3 个小区,单个小区长为 220 m、宽为 4 m,并预留每个小区地头地尾各 10 m,方便拖拉机转向和试验前装置测试校正。考虑到土壤冻结对试验结果的影响,试验前对地

块进行浅旋作业以创造适宜种床环境,同时,取下播种机单体覆土轮以减小覆土作业对限深轮压实地表和开沟深度的影响,保证后续播种下压力和深度测量的准确性。



图9 系统田间试验
Fig.9 Field test of control system

为比较不同调节方式的下压力和播深调节效果,对播种机单体行设置不同控制方式,其中,第1、3、4、6行为主动气囊式,第2行为被动弹簧式,第5行为自重调节,即除单体自重外无外部下压力作用。同时,为比较不同设定下压力对播种质量影响,串联第1、3行气囊为左区控制,第4、6行为右区控制,并设置左区目标下压力为600 N,右区目标下压力为300 N,调节阈值为100 N。此外,作业前对3个小区分别调节播种深度为25、50、75 mm左右,在保证6行单体全部达到初始设定深度情况下,通过软件界面校正下压力测量模型。试验过程中,保持机具速度8 km/h左右,下压力控制间隔时间为3 s。

4.1.1 土壤压实效果

由于实际作业过程中地表所受压力不易测量,试验采用FieldScout SC900型土壤紧实度仪测量压实土壤紧实度来表征下压力,其可自动获取测量点地表深度和紧实度,对应分辨率分别为2.5 cm和35 kPa。首先在3个不同播深小区选取50 m稳定作业长度,间隔10 m测量各单体行限深轮胎面压实处和相邻地表土壤紧实度,其中,紧实度测量深度范围为0~10 cm,并根据仪器分辨率间隔2.5 cm记录坚实度(图10)。然后,以原始地表和限深轮胎面压实处对应深度紧实度差值作为测量点下压力实际作用紧实度。考虑到土壤区间差异性,以各单体行6处测量点均值作为单体行紧实度。最后,根据各单体行紧实度和不同下压力作用方式对应播种行范围来计算相应方式下土壤紧实度,即左区控制紧实度为第1、3行平均值,右区控制紧实度为第4、6行平均值,机械调节和自重调节分别为第2行和第5行紧实度。

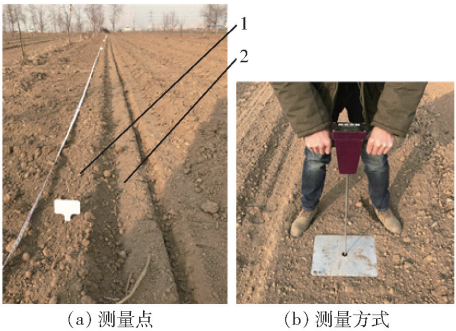


图10 田间土壤紧实度测量
Fig.10 Field measurement of soil compaction
1. 原始地表 2. 限深轮胎面压实处

4.1.2 下压力控制效果

由于土壤紧实度的测量受土壤物化特性影响较大,为更好评价系统下压力控制效果,通过软件控制程序按照20 Hz采样频率存储播种机各单体行实时下压力,并选取中间段90 s数据进行处理。同上,对于左右区控制方式,取区内各播种行平均值作为实时下压力,并计算不同播深和控制方式作用时下压力控制效果,其计算公式为

$$\eta_1 = \frac{n_1}{N_1} \times 100\% \tag{6}$$

$$\bar{F} = \frac{\sum F_i}{N_1} \tag{7}$$

$$S_F = \sqrt{\frac{\sum (F_i - \bar{F})^2}{N_1}} \tag{8}$$

$$V_F = \frac{S_F}{\bar{F}} \times 100\% \tag{9}$$

式中 η_1 ——播种下压力合格率,%
 n_1 ——阈值范围内播种下压力个数
 N_1 ——播种下压力测量点总数
 $\bar{F}$ ——播种下压力平均值,N
 F_i ——播种下压力测量值,N
 S_F ——播种下压力标准差,N
 V_F ——播种下压力变异系数,%

4.1.3 播深控制效果

为评价不同下压力作用方式下播深控制效果,试验通过播深测量装置实时测量3种设定播深下各单体行实时播种深度,同样选取90 s测量数据,并参照农业行业标准NY/T 1768—2009《免耕播种机质量评价技术规范》对播深相关参数进行评价,各参数计算公式为

$$\eta_2 = \frac{n_2}{N_2} \times 100\% \tag{10}$$

$$\bar{h} = \frac{\sum h_i}{N_2} \tag{11}$$

$$S_h = \sqrt{\frac{\sum (h_i - \bar{h})^2}{N_2}} \tag{12}$$

$$V_h = \frac{S_h}{\bar{h}} \times 100\% \tag{13}$$

式中 η_2 ——播深合格率, %
 n_2 ——播深合格数
 N_2 ——播深测量点总数
 $\bar{h}$ ——播深平均值, mm
 h_i ——播深测量值, mm
 S_h ——播深标准差, mm
 V_h ——播深变异系数, %

4.2 结果分析

4.2.1 土壤实际压实效果

对田间紧实度测量数据进行处理,得到如图 11 所示不同控制方式在不同设定播深下土壤紧实度结果。可以看出,不同控制方式均提高了土壤紧实度,

实现了种沟压实的目标。除自重调节方式外,在其他 3 种方式作用下,相同地表深度的土壤紧实度随着设定播深的增加呈一定减小趋势,这是由于单体对地作用力主要用于开沟和限深镇压,随着播深的增加,开沟器开沟阻力增大,进而造成单体对地作用力的再分配,在单体对地作用力无法获得及时补偿的情况下,开沟压力的增大势必带来限深轮对地下压力的减小。相比之下,自重调节方式的土壤紧实度改变波动较大,说明外力作用可以提高单体对地压实稳定性。此外,在相同地表深度土壤紧实度改变量上,不同设定播深下的分区控制方式曲线数值较为集中(图 11a、11b),说明主动调节方式可以实现更为稳定的限深轮对地下压力,特别是右区控制。而在 10 cm 地表深度下,左区控制和机械调节方式作用的土壤紧实度在设定播深 25 mm 下改变较大,此时下压力对紧实度的改变影响较小,其变化更多来源于土壤耕层物化特性的改变。

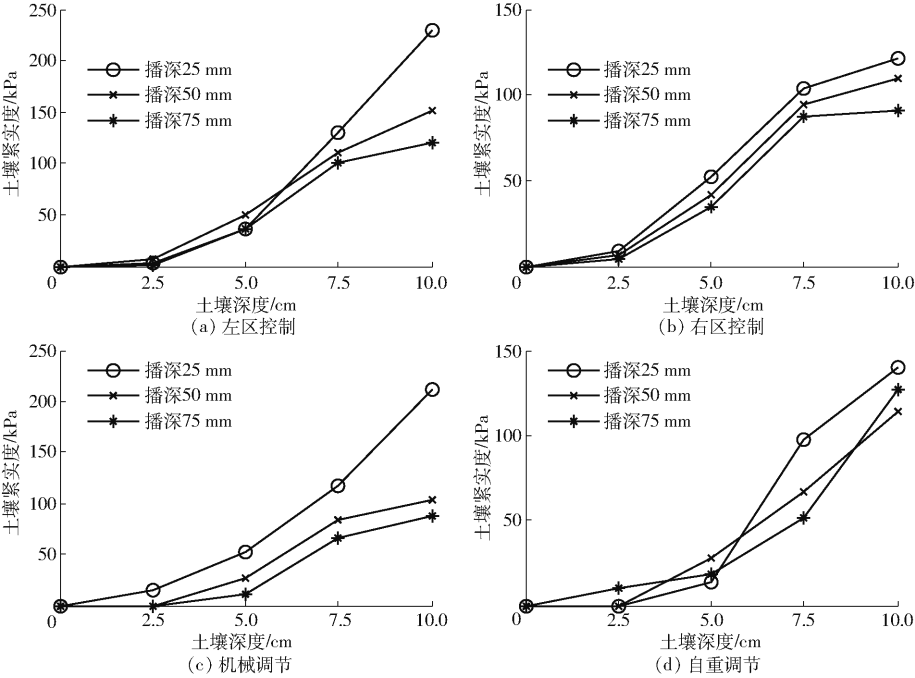


图 11 不同控制方式下土壤紧实度变化曲线
Fig. 11 Changes of soil compaction in different control modes

4.2.2 播种下压力控制效果

播种下压力控制试验结果如图 12 所示。整体来看,分区控制时,不同设定播深下,右区控制下压力基本处于 200 ~ 400 N,满足基本下压力设定,而左区控制下压力则随播深变化而略有不同,如播深 25 mm 下变化范围基本在 500 ~ 700 N 之间,播深 50 mm 下则处于 400 ~ 600 N 之间,播深 75 mm 下多处于 300 ~ 500 N 之间。从图中看出,随着播种深度的增加,左区控制下压力变化范围逐渐减小。同样的变化也发生在机械调节和自重调节控制方式下,

如机械调节下压力变化范围从播深 25 mm 的 300 ~ 600 N 变化为播深 75 mm 的 0 ~ 200 N;自重调节下压力变化范围从播深 25 mm 的 0 ~ 300 N 变化为播深 75 mm 的 0 ~ 100 N,即播种深度的增加造成限深轮处下压力的减小,这也与图 11 紧实度的变化趋势相符。由此看出,在当前作业地块,装置左区控制、机械和自重调节方式均已达到最大调节能力,在土壤阻力增大情况下无法提供更大的向下作用力来保证稳定的限深轮对地下压力,而右区控制设定下压力则较为适合作业地块土壤环境,即在播深变化下

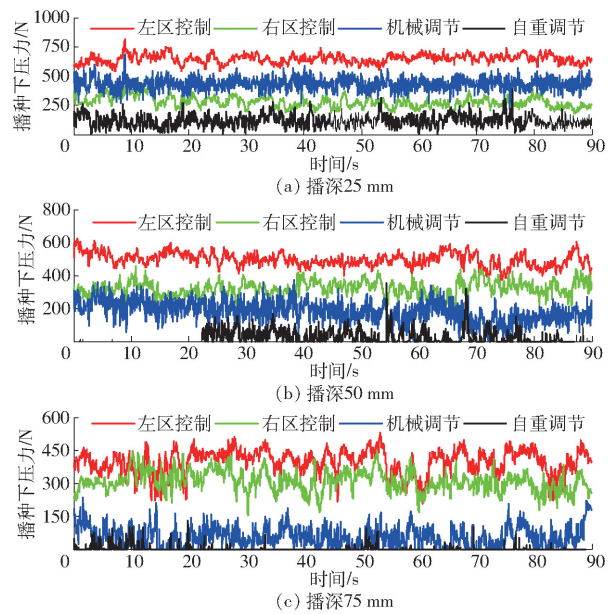


图 12 不同播深和控制方式下播种下压力控制效果

Fig. 12 Effects of downforce control under different sowing depths and control modes

依然保持稳定的播种下压力。对设定播深 50 mm 和 75 mm, 单体自重调节方式下的播种下压力出现间断性为零现象, 即限深轮摆臂脱离限深块, 播种深度低于设定值, 说明此时单纯依靠单体自重调节无法保证较好的播深控制效果。

数据统计结果如表 3 所示。从播种下压力平均值看出, 不同设定播深下, 右区控制方式的播种下压力能够始终保持在 300 N 左右, 设定阈值范围内合格率不小于 95.78%, 下压力变异系数变化较小, 处于 14.11% ~ 17.32%, 而左区控制下压力变异系数虽不超过 14.13%, 但其合格率随播深增加而显著减小, 最小仅为 0.39%, 无法满足稳定下压力的播种要求。

对无下压力设定值的机械调节和自重调节方式

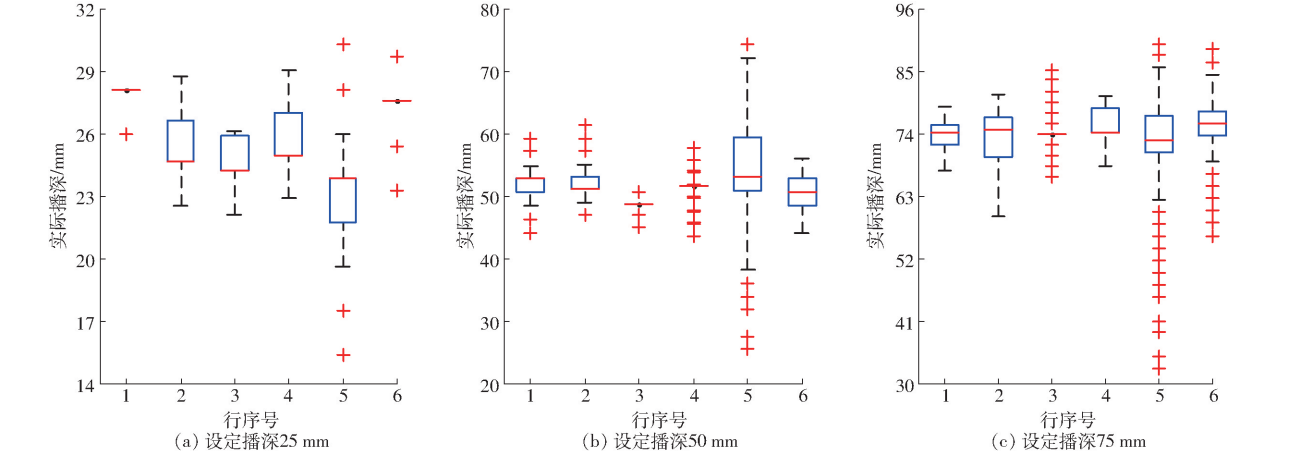


图 13 不同设定播深下单体行实际播深箱线图

Fig. 13 Actual sowing depth boxplots of row units under different setting depths

表 3 播种下压力控制田间试验结果				
Tab.3 Field experiment results of seeding downforce control				
评价参数	控制方式	播深/mm		
		25	50	75
平均值/N	左区控制	646.85	496.06	395.92
	右区控制	278.74	317.96	308.05
	机械调节	431.82	179.86	55.47
	自重调节	116.10	21.05	3.11
合格率/%	左区控制	91.77	45.19	0.39
	右区控制	96.11	95.78	96.05
标准差/N	左区控制	38.08	41.06	55.94
	右区控制	48.28	44.88	46.84
	机械调节	52.29	62.32	46.43
	自重调节	49.82	36.16	11.96
变异系数/%	左区控制	5.89	8.28	14.13
	右区控制	17.32	14.11	15.21
	机械调节	12.11	34.65	83.72
	自重调节	42.91	171.77	385.11

而言,其下压力变异系数随播深改变而变化较大,特别是自重调节方式下从播深 25 mm 的 42.91% 增加到播深 75 mm 的 385.11%, 而机械调节方式从 12.11% 增大至 83.72%。再次说明仅依靠单体自重无法实现稳定的播种下压力;机械调节方式在低播深下可保持稳定播种下压力,而高播深下采用主动下压力调节方式可提高播种下压力稳定性,且适宜的下压力设置能保证不同播深下稳定的播种下压力控制效果。

4.2.3 播种深度控制效果

不同设定播深下,各单体行实际播深分布特征如图 13 所示。在设定播深 25 mm 下,第 1 行和第 6 行数据较为集中,说明这两行播深稳定性较好。同样情况也出现在设定播深 50 mm 下的第 3 行和第 4 行,以及设定播深 75 mm 下的第 3 行,说

明分区控制方式可以获得更好的播深稳定性。整体看来,25 mm 设定播深时,不同下压力调节方式下实际播深波动范围差别较小,此时单体对地压力均满足基本开沟镇压需求;从图中箱体大小变化可以看出,随着播深增加,机械和分区控制方式下的实际播深比自重调节方式更为集中,且自重调节方式下存在较多播深异常情况,这也与上文播种下压力间断性为零现象相符,说明此时限深轮处于浮动状态,实际播深低于设定值。

进一步计算不同行播深质量参数,对左右区取其行间参数平均值来评价,计算得到结果如表 4 所示。从表中看出,不同控制方式下实际播种深度平均值与初始设定值略有差异,考虑到播深调节机构因自身机械结构特征无法达到较高的设定精度,本试验播深结果均达到初始作业目标。在播深合格率评价选择上,针对浅旋地试验条件,为更好表征不同控制方式下差异特征,选择 ± 5 mm 为合格播深允许误差。

表 4 播种深度控制田间试验结果

Tab.4 Field experiment results of sowing depth control				
评价参数	控制方式	播深/mm		
		25	50	75
平均值/mm	左区控制	26.27	50.05	73.95
	右区控制	26.77	50.93	75.52
	机械调节	25.15	52.46	74.34
	自重调节	23.17	54.96	73.44
合格率/%	左区控制	100	96.92	91.92
	右区控制	100	98.39	92.53
	机械调节	100	78.94	70.44
	自重调节	83.33	58.72	64.78
标准差/mm	左区控制	0.92	1.45	2.22
	右区控制	1.01	2.24	3.11
	机械调节	1.01	2.21	3.69
	自重调节	2.53	7.70	6.22
变异系数/%	左区控制	3.52	2.85	3.00
	右区控制	3.80	4.40	4.12
	机械调节	4.03	4.22	4.96
	自重调节	10.94	14.01	8.47

从表 4 看出,随着设定播深的增加,不同控制方式的播深合格率显著降低,播深标准差逐渐增大,如自重调节方式播深合格率从 25 mm 播深的 83.33% 降到 50 mm 播深的 58.72%,降低了 24.61 个百分点,播深标准差从最小 2.53 mm 增加到最大 7.70 mm。相比之下,当设定播深从 25 mm 变为 75 mm 时,左区控制、右区控制和机械调节方式播深合格率分别降低了 8.08、7.47、29.56 个百分点,达到最小 91.92%、92.53% 和 70.44%,播深标准差分

别从 0.92、1.01、1.01 mm 增加到最大 2.22、3.11、3.69 mm。说明外力作用下的分区控制和机械调节方式提高了播深合格率,降低了播深标准差,且分区控制方式比机械调节方式更有助于提高单体播深稳定性。同样结论也可从播深变异系数变化规律分析上获得,如不同设定播深下,左右区控制方式、机械调节方式变异系数分别处于 2.85% ~ 3.52%、3.80% ~ 4.40% 和 4.03% ~ 4.96% 之间,而自重调节方式变异系数则处于 8.47% ~ 14.01% 之间。对比左右区控制方式结果发现,较大下压力可降低播深变异系数和标准差。

5 结论

(1) 设计了一种多行播种机下压力和播深 CAN 总线监控与评价系统,采用基于角度和轴销传感器的播深和下压力测量装置,利用 GNSS 传感器采集播种机实时位置和速度信息,以 ECU 作为系统控制单元,对作业参数进行监测控制和质量评价,采用液压驱动和分区控制方式优化设计了气压驱动装置,开发了基于 CoDeSys 编程环境的软件界面和控制程序,实现了 ECU 与智能终端的 CAN 总线通信。

(2) 通过搭建的室内试验台完成了播深传感器标定和建模,建立了匹配不同设定播深的下压力测量校正模型。对多行播种机分区控制响应测试表明,在气囊调节范围(0.2 ~ 0.6 MPa)内,分区控制方式超量量低于 5.97%;系统响应调节时间随控制行数 and 设定气压增大而增大,当 6 行播种机设定气压不大于 0.4 MPa 时,其调节时间最长不超过 0.35 s,当设定气压为 0.4 ~ 0.6 MPa,响应时间显著增大,最长达 2.35 s。

(3) 在不同下压力控制方式和设定播深下进行了田间性能试验。土壤压实和下压力控制效果试验表明,相比自重调节和机械调节,主动分区控制方式可实现更为稳定的土壤紧实度,且在浅旋地块环境下,右区控制方式对不同设定播深的下压力控制效果最佳,其合格率不小于 95.78%。播深控制效果试验表明,随着设定播深的增大,播深控制合格率显著降低,标准差逐渐增大。在设定播深 25 ~ 75 mm 范围内,左区控制、右区控制、机械调节和自重调节对应的最小播深合格率分别为 91.92%、92.53%、70.44% 和 58.72%,对应的最大标准差分别为 2.22、3.11、3.69、7.70 mm,对应的最大变异系数分别为 3.52%、4.40%、4.96% 和 14.01%,即相比机械调节和自重调节,分区控制方式更有助于提高单体播深稳定性。

参 考 文 献

- [1] 张东兴. 玉米全程机械化生产技术与装备[M]. 北京:中国农业大学出版社,2014.
- [2] 杨丽,颜丙新,张东兴,等. 玉米精密播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11):38-48.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161106&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.006. (in Chinese)
- [3] 苑严伟,白慧娟,方宪法,等. 玉米播种与测控技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(9):1-18.
YUAN Yanwei, BAI Huijuan, FANG Xianfa, et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 1-18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180901&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.001. (in Chinese)
- [4] 付卫强. 玉米免耕精密播种质量控制关键技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2019.
FU Weiqiang. Study on key technology of quality control for maize no-tillage drilling machinery [D]. Beijing: China Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [5] John Deere. TruSet™ tillage technology [EB/OL]. [2019-12-11]. <https://www.deere.com/en/tillage/truset/>.
- [6] Ag Leader. Full-farm connectivity [EB/OL]. [2019-12-10]. <https://www.agleader.com/planting/sureforce/>.
- [7] Kinze. Retrofit kits [EB/OL]. [2019-12-11]. <https://www.kinze.com/owners/retrofit-kits>.
- [8] Precision Planting. 20/20 data drives decision [EB/OL]. [2019-12-10]. <https://www.precisionplanting.com/products/product/2020>.
- [9] HE X T, DING Y Q, ZHANG D X, et al. Development of a variable-rate seeding control system for corn planters part I: design and laboratory experiment [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 318-327.
- [10] 杨硕,王秀,高原源,等. 电动机驱动玉米气吸排种器总线控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(2): 57-67.
YANG Shuo, WANG Xiu, GAO Yuanyuan, et al. Design and experiment of motor driving bus control system for corn vacuum seed meter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 57-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190207&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.007. (in Chinese)
- [11] 丁友强,刘彦伟,杨丽,等. 基于 Android 和 CAN 总线的玉米播种机监控系统研究[J/OL]. 农业机械学报,2019, 50(12):33-41.
DING Youqiang, LIU Yanwei, YANG Li, et al. Monitoring system of maize precision planter based on Android and CAN bus [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 33-41. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191204&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.004. (in Chinese)
- [12] 黄东岩,朱龙图,贾洪雷,等. 基于 GPS 和 GPRS 的远程玉米排种质量监测系统[J]. 农业工程学报,2016,32(6): 162-168.
HUANG Dongyan, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Remote monitoring system for corn seeding quality based on GPS and GPRS [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 162-168. (in Chinese)
- [13] 纪超,陈学庚,陈金成,等. 玉米免耕精量播种机排种质量监测系统[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(8):1-6.
JI Chao, CHEN Xuegeng, CHEN Jincheng, et al. Monitoring system for working performance of no-tillage corn precision seeder [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 1-6. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160801&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.001. (in Chinese)
- [14] 和贤桃,郝永亮,赵东岳,等. 玉米精量排种器排种质量自动检测仪设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(10): 19-27.
HE Xiantao, HAO Yongliang, ZHAO Dongyue, et al. Design and experiment of testing instrument for maize precision seed meter's performance detection [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 19-27. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161003&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.003. (in Chinese)
- [15] 任守华,赵斌,李玉清,等. 玉米播种机播深检测装置的设计与试验研究[J]. 农机化研究,2015,37(12):12-15.
REN Shouhua, ZHAO Bin, LI Yuqing, et al. Design and experimental study of deep detection device of corn seeder [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(12): 12-15. (in Chinese)
- [16] 闫荆,朱龙图,于婷婷,等. 免耕播种机播种深度实时监测系统[J]. 农机化研究,2016,38(9):214-218, 223.
YAN Jing, ZHU Longtu, YU Tingting, et al. Seeding depth real-time monitoring system for a no-till planter [J]. Journal of

- Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(9): 214–218, 223. (in Chinese)
- [17] 赵金辉, 刘立晶, 杨学军, 等. 播种机开沟深度控制系统的设计与室内试验 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 35–41. ZHAO Jinhui, LIU Lijing, YANG Xuejun, et al. Design and laboratory test of control system for depth of furrow opening [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 35–41. (in Chinese)
- [18] 乔金友, 张丹, 张宏彬, 等. 大中小型拖拉机压实对土壤坚实度和大豆产量的影响 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 26–33. QIAO Jinyou, ZHANG Dan, ZHANG Hongbin, et al. Effects of soil compaction by various tractors on soil penetration resistance and soybean yields [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(21): 26–33. (in Chinese)
- [19] PONCET A M, FULTON J P, MCDONALD T P, et al. Corn emergence and yield response to row-unit depth and downforce for varying field conditions [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2019, 35(3): 399–408.
- [20] HANNA H M, STEWARD B L, ALDINGER L. Soil loading effects of planter depth-gauge wheels on early corn growth [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2010, 26(4): 551–556.
- [21] 梁方, 雷洪奥, 郑思远, 等. 开沟深度定压电液仿形控制系统设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 1–8. LIANG Fang, LEI Qi'ao, ZHENG Siyuan, et al. Design and experiment of electro-hydraulic profiling system with consistent pressure for drilling depth of furrow opener [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(21): 1–8. (in Chinese)
- [22] 黄东岩, 朱龙图, 贾洪雷, 等. 基于压电薄膜的免耕播种机播种深度控制系统 [J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 1–8. HUANG Dongyan, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Automatic control system of seeding depth based on piezoelectric film for no-till planter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 1–8. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150401&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.001. (in Chinese)
- [23] 付卫强, 董建军, 梅鹤波, 等. 玉米播种单体下压力控制系统设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 68–77. FU Weiqiang, DONG Jianjun, MEI Hebo, et al. Design and test of maize seeding unit downforce control system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 68–77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180608&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.008. (in Chinese)
- [24] 高原源, 王秀, 杨硕, 等. 播种机气动式下压力控制系统设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 19–29, 83. GAO Yuanyuan, WANG Xiu, YANG Shuo, et al. Design and test of pneumatic downforce control system for planting [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 19–29, 83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190702&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.002. (in Chinese)
- [25] VIRK S S, FULTON J P, PORTER W M, et al. Row-crop planter performance to support variable-rate seeding of maize [J]. Precision Agriculture, 2020, 21: 603–619.
- [26] 蒋建东, 孙远方, 金骁, 等. 联合收获机 CAN 总线架构设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 93–99. JIANG Jiandong, SUN Yuanfang, JIN Xiao, et al. CAN bus architecture design and test of combine harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 93–99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190610&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.010. (in Chinese)
- [27] PARAFOROS D S, SHARIPOV G M, GRIEPENTROG H W. ISO 11783-compatible industrial sensor and control systems and related research: a review [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 163: 104863.
- [28] 刘成良, 林洪振, 李彦明, 等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析 [J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 1–18. LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 1–18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200101&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.001. (in Chinese)
- [29] 高原源, 翟长远, 杨硕, 等. 播种单体对地下压力测量方法与数学模型 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 1–9. GAO Yuanyuan, ZHAI Zhangyuan, YANG Shuo, et al. Measurement method and mathematical model for seeding downforce of planter row unit [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5): 1–9. (in Chinese)
- [30] 高原源, 王秀, 杨硕, 等. 基于 CAN 总线的播种深度监测评价系统研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 23–32. GAO Yuanyuan, WANG Xiu, YANG Shuo, et al. Development of CAN-based sowing depth monitoring and evaluation system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 23–32. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191203&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.003. (in Chinese)