

双芽蔗段横向种植机沟深控制系统设计与试验

李尚平^{1,2} 李鑫志^{1,3} 文春明^{1,3} 李凯华^{1,3} 李洋^{1,3} 叶滢敏^{1,3}

(1. 广西民族大学电子信息学院, 南宁 530006; 2. 蔗糖产业省部共建协同创新中心, 南宁 530004;

3. 广西高校智慧无人系统与智能装备重点实验室, 南宁 530006)

摘要: 针对前期研制的甘蔗双芽蔗段横向种植机在丘陵地区开沟过程中沟深不稳定、不宜操作等问题,结合横向种植机工作特点,设计了一种甘蔗横向种植机沟深控制系统,由激光测距传感器、压力变送器及单片机控制系统组成,研究了后犁沟深与油缸负载压力的关系,通过实时监测拖拉机提升液压油缸负载压力、沟深变化,并与设定的沟深阈值比较,通过控制系统实现对沟深的自动控制。首先,通过理论分析、Simulink 仿真建模,对上拉杆与下拉杆的位移关系进行了运动仿真。研究了开沟过程中甘蔗横向种植机的三点悬挂负载方式,建立了拖拉机液压提升油缸位移与后犁沟深关系的理论模型。其次,设计了基于单片机液压控制系统,搭建了双芽蔗段横向种植机沟深控制系统试验平台。最后,在试验平台上进行了性能验证试验及多因素正交试验,对沟深稳定性系数的主要影响因素及影响沟深控制的规律进行了探讨;试验结果表明,系统调节响应速度小于1 s,不同开沟深度沟深稳定性系数均大于90%,在设定的范围内,试验结果与设定值基本吻合,验证了沟深控制程序可靠性。通过多因素正交试验可知,交互因素中液压调速阀开度、开沟深度均对沟深稳定性系数产生显著影响,试验结果表明,当调速阀开度为0.56圈、土壤含水率为27.4%、开沟深度为29.6 cm时,沟深稳定性系数最高,为95.87%。

关键词: 甘蔗横向种植机; 沟深自动控制系统; 液压阈值控制

中图分类号: S223.2⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)12-0022-11

OSID:



Tillage Depth Control System for Double-bud Cane Section Transverse Planters

LI Shangping^{1,2} LI Xinzhi^{1,3} WEN Chunming^{1,3} LI Kaihua^{1,3} LI Yang^{1,3} YE Yingmin^{1,3}

(1. College of Electronic Information, Guangxi Minzu University, Nanning 530006, China

2. Province and Ministry Co-sponsored Collaborative Innovation Center of Canesugar Industry, Nanning 530004, China

3. Guangxi Key Laboratory of Intelligent Unmanned System and Intelligent Equipment for Universities, Nanning 530006, China)

Abstract: Aiming at the problem of unstable tillage depth and unsuitable operation during the furrowing process of the sugarcane double-bud cane section transverse planter developed in the previous stage in hilly areas, combining with the working characteristics of the transverse planter, a tillage depth monitoring system for the sugarcane transverse planter was designed, which consisted of a laser range sensor, a pressure sensor and a single-chip microcomputer control system, and the relationship between the tillage depth of the rear plough and the load pressure of the cylinder was studied, so as to realize automatic control of the tillage depth by real-time monitoring of the tractor lifting hydraulic by real-time monitoring the tractor lifting hydraulic cylinder load pressure, tillage depth changes, and compared with the set tillage depth threshold, the automatic control of tillage depth was achieved through the control system. Firstly, through theoretical analysis and Simulink simulation modelling, the motion simulation analysis of the displacement relationship between the upper tie-bar and the lower tie-bar was carried out. The three-point suspension load mode of the sugarcane transverse planter in the tillage process was studied, and the theoretical model of the relationship between the displacement of the hydraulic lifting cylinder of the tractor and the tillage depth of the rear plough was established. Secondly, a microcontroller-based hydraulic control system was designed to build a test platform for the tillage depth monitoring system of the double-bud cane section transverse planter. Finally, the performance verification

收稿日期: 2023-11-07 修回日期: 2024-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(52165009)

作者简介: 李尚平(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事智能制造技术信息化研究,E-mail: spli501@vip.sina.com

test and multi-factor orthogonal test were carried out on the test platform to explore the main influencing factors of the tillage depth stability coefficient and the laws affecting the tillage depth control; the test data showed that the system's regulation response speed was less than 1 s, and the coefficients of the tillage depth stability for different tillage depths were all greater than 90%, which was in the range of the setup, and the test results basically matched with the setup values, which verified that the tillage depth control procedure was reliability. Through the multi-factor orthogonal test, it can be seen in the interactive factors of hydraulic speed valve opening, set the value of tillage depth would have a significant impact on the stability coefficient of tillage depth, according to the results of the test when the speed valve opening was 0.56, the soil moisture content of 27.4%, set the tillage depth of 29.6 cm, the highest coefficient of stability of the tillage depth was 95.87%.

Key words: sugar cane transverse planter; automatic control system for tillage depth; hydraulic threshold control

0 引言

我国 90% 以上的甘蔗糖料产区集中在广西、云南、广东、海南等地区，广西的糖料蔗约占全国的 60%，且丘陵甘蔗地约占 60% 以上。目前在丘陵地区种植甘蔗存在沟深作业质量不稳定、沟深不足等问题，严重影响了甘蔗的生产质量和产量。

关于种植机械沟深监测问题，JENSEN 等^[1]指出了沟深控制对种植机的重要性；WEATHERLY 等^[2]设计了基于电液比例技术的播种深度控制系统，以迅速检测播前地表的起伏情况，保证播种深度一致性并提高种子的发芽率。SUOMI 等^[3]研发了一种符合 ISO 11783 标准的播种深度自动控制系统；周生龙^[4]研究了农机作业的沟深检测方法，利用双倾角传感器获得农机作业状态沟深信息，解决了非水平地面的作业状态信息获取。这些研究成果为甘蔗种植机的沟深监测系统开发提供了有益参考。

甘蔗横向种植机在甘蔗种植过程中，需要完成开沟、布种、施肥、覆土的全过程自动化。然而广西地区丘陵地貌导致部分蔗田分布散乱，若甘蔗地地形不平整，将导致甘蔗种植时沟深难以保持一致，使得甘蔗种植深度不均匀，生长过程容易发生倒伏现象，缺乏良好的抗倒伏性状，直接影响甘蔗的种植质量与产量^[5]。

针对上述问题，本文以自主设计的双芽蔗段横向种植机为研究对象，通过理论分析、Matlab 虚拟仿真和试验平台试验研究，分析甘蔗横向种植机开沟系统与沟深之间的运动机理，寻找影响沟深的关键参数及控制参数。通过仿真分析和试验研究，探究关键测量参数与沟深之间的关系模型，从而实现沟深的实时监测与自动反馈控制^[6-8]。

1 沟深控制系统方案设计

1.1 种植机开沟系统结构

甘蔗横向种植机的开沟系统由开沟部件与开沟

控制系统组成。开沟部件紧随拖拉机悬挂装置安装，开沟部件的结构如图 1 所示，主要由旋耕装置、破土前犁、开沟后犁、后犁主梁、连接筋板等组成，其中前犁承担破土功能，旋耕装置具有碎土、松土功能，后犁主要承担开沟的功能，为横向精准播种提供有效的落种空间，旋耕装置的动力由拖拉机传动轴提供^[9]。开沟系统的实际工作状态如图 2 所示，开沟的沟底至沟面的深度即为沟深。现有开沟控制系统为人工控制，机手通过控制提升液压油缸的升降来实现下拉杆的转动，下拉杆通过三点悬挂装置带动种植机机体的运动，从而使开沟犁产生角度的变化和高度的升降，实现对沟深的控制。

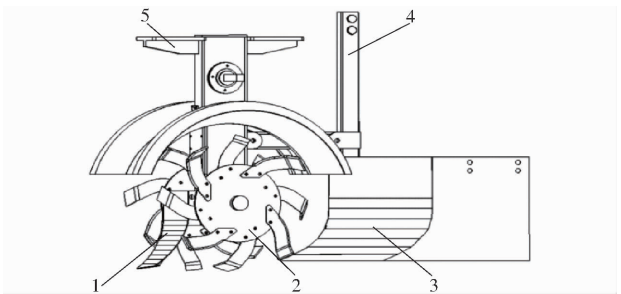


图 1 开沟系统整体结构图

Fig. 1 Trenching system integral mechanism

1. 破土前犁 2. 旋耕装置 3. 开沟后犁 4. 后犁主梁 5. 连接筋板



图 2 后犁实际工作状态

Fig. 2 Actual working condition of rear plow

1.2 沟深监测及控制可行性分析

甘蔗横向种植机的沟深通过拖拉机的提升油缸和三点悬挂装置来实现控制，因此，需要研究分析三

点悬挂的工作原理,从而得出沟深监测控制方法。

1.2.1 三点悬挂机构组成及工作原理

自主研发的甘蔗横向种植机,悬挂机构采用三点悬挂式,通过拖拉机提升液压缸提起其上拉杆,带动四连杆机构实现对种植机具的提升、降落和牵引。三点悬挂主要由提升臂、提升杆、固定支架、下拉杆等部件组成,如图3所示。

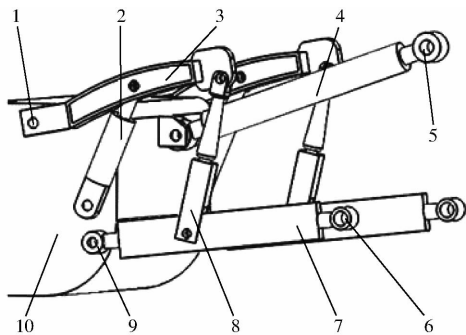


图3 拖拉机三点悬挂装置结构示意图

Fig.3 Tractor three-point suspension

1. 上铰接点 2. 液压油缸 3. 提升臂 4. 上拉杆 5. 上悬挂点
6. 下悬挂点 7. 下拉杆 8. 提升杆 9. 下铰接点 10. 固定支架

拖拉机悬挂机构的上拉杆和下拉杆一端可分别绕拖拉机后架的固定点转动,另一端分别与甘蔗种植机悬挂机构的3个悬挂孔连接。下拉杆为主动件,人工使用控制器通过控制液压缸直接相关的三位四通电磁换向阀改变提升液压缸油路的方向,从而实现控制液压油缸的伸缩,而液压油缸的伸缩则可以实现提升臂的运动控制。进而通过四连杆机构完成对负载机架的提升、下放,总结来说,通过对三点悬挂的四连杆机构运动控制,可实现对整个机架连接后犁的沟深调整^[10]。

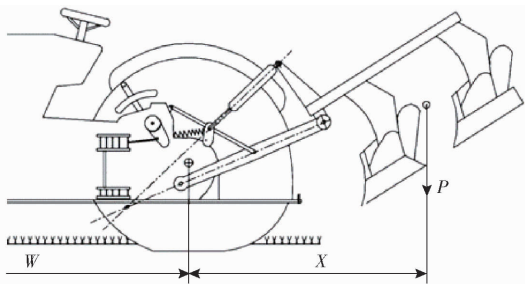


图4 三点悬挂连接示意图

Fig.4 Schematic of three-point suspension connection

根据对甘蔗横向种植机的总体设计分析得知^[11],后犁为与开沟深度直接相关的机械部件,横向种植机后犁设计为直连式(如图4所示),后犁与地面的夹角和下拉杆与地面夹角一致,则由三角形相似原理可知,下拉杆铰接点位移与后犁距地面位移成比例关系,种植机悬挂机构与拖拉机连接可以简化为四连杆机构,其简化的原理图如图5所示。

图5中 l_A 为下拉杆长度, l_B 为种植机连接杆长

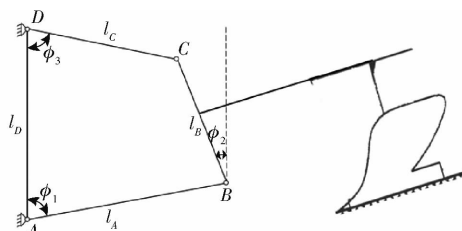


图5 三点悬挂简化结构原理图

Fig.5 Simplified structural principle diagram of three-point suspension

度, l_C 为上拉杆长度, l_D 为拖拉机机架长度, B 、 C 为种植机悬挂机构的上、下悬挂孔,下拉杆和上拉杆分别绕定点 A 和定点 D 转动。根据连杆机构运动学分析得

$$\begin{cases} l_A \cos \phi_1 + l_B \cos \phi_2 + l_C \cos \phi_3 = l_D \\ l_B \sin \phi_2 + l_C \sin \phi_3 = l_A \sin \phi_1 \end{cases} \quad (1)$$

消去 ϕ_2 解得

$$\begin{cases} l_B^2 = l_A^2 + l_C^2 + l_D^2 - 2l_C l_D \cos \phi_3 + 2l_A l_C \cos(\phi_3 - \phi_1) - 2l_A l_D \cos \phi_1 \\ x_B = x_A + l_A \cos \phi_1 \\ y_B = y_A + l_A \sin \phi_1 \end{cases} \quad (2)$$

- 式中 ϕ_1 ——机架与下拉杆夹角
 ϕ_2 ——连接杆与机架夹角
 ϕ_3 ——拖拉机机体与上拉杆夹角
 (x_A, y_A) ——机架与下拉杆连接点坐标
 (x_B, y_B) ——连接杆与下拉杆连接点坐标

当拖拉机型号和悬挂机构孔位布局确定后,拖拉机下拉杆长度 l_A 、上拉杆长度 l_C 、定点 AD 的距离 l_D 和三点悬挂孔的距离 l_B 均为固定值,旋耕组合开沟器安装在机架下端,开沟犁与下悬挂点 B 的相对位置保持不变。由式(2)可知,甘蔗种植机作业过程中,开沟犁高度以及与地面的角度仅与拖拉机三点悬挂结构的下拉杆转动位置有关,即下拉杆位置与开沟犁倾角和高度都有唯一对应的关系。

1.2.2 三点悬挂机构运动轨迹仿真分析与推理

为证明控制液压悬挂机构可实现沟深的控制,在Matlab中建立Sport.m文件,建立运动仿真模型,对三点悬挂四连杆机构上、下提升杆的运动轨迹进行运动仿真分析(如图6所示),由实机测量得到雷沃1840G系列拖拉机三点悬挂四连杆的提升臂、提升杆、下拉杆与固定支架的长度分别为295、746、610、946 mm,将其输入运动学仿真模型分析可得到,在匀角速度不变情况下,各曲柄转角轨迹一致。由四连杆运动学轨迹分析得到上下两点一一对应的运动关系。

选取上拉杆与水平面 60° 角作为初始运动的节点,其与上拉杆带动下拉杆的运动坐标一一对应,每

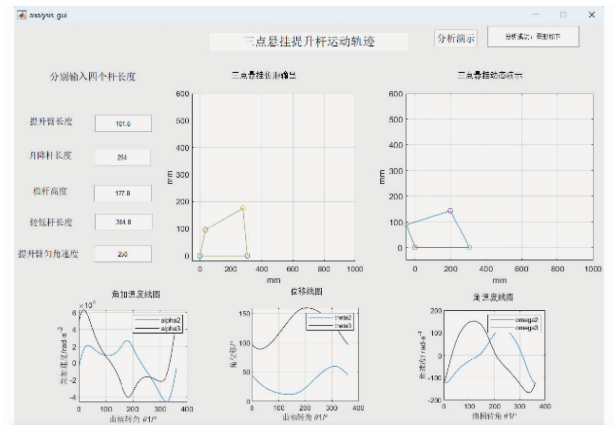


图 6 四连杆提升运动轨迹仿真界面

Fig. 6 Simulation interface of four-link lifting trajectory

转 1° 进行一次坐标记录, 选取 $60^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 作为完整运动轨迹, 如图 7 所示。从初始角度开始选取共 31 个角度对两点运动坐标进行运动仿真分析。

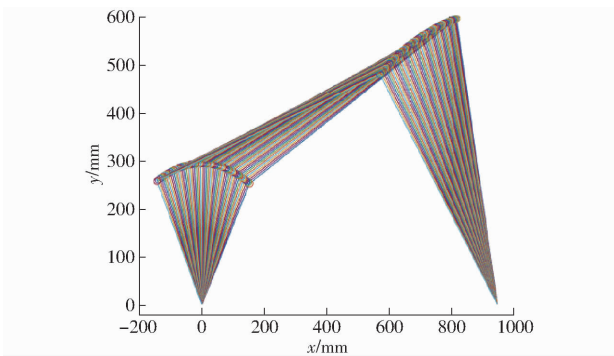


图 7 上下拉杆端点运动轨迹图

Fig. 7 Upper and lower tie rod endpoint movement trajectory diagram

以上拉杆与拖拉机连接位置为零点坐标, 得到所需测量的上下拉杆的运动轨迹, 提取其运动轨迹坐标, 分别得到上拉杆与下拉杆在垂直方向的运动坐标, 经过 Origin 取二阶拟合得到曲线如图 8 所示。

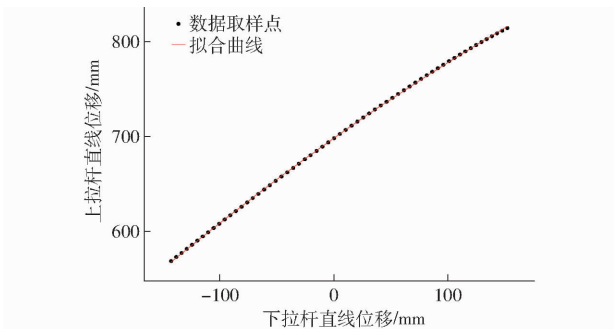


图 8 上拉杆运动趋势拟合曲线

Fig. 8 Tie-bar motion trend fitting curve

拟合得到的函数 $f(x)$ 为

$$f(x) = 698.5 + 0.84x - 4.62 \times 10^{-4}x^2 \quad (3)$$

根据公式(3)可知: 可以由上拉杆的变化量计算下拉杆的变化量, 即沟深的变化量。由于上拉杆的变化是由液压缸伸缩引起, 故液压缸的活塞位移

L 与上拉杆的位移 L_x 之间存在一定的比例关系, 该比例关系为 $k = \frac{L}{L_x}$, 根据不同拖拉机机型, 可得不同的 k 值, 将 k 代入公式(3)中得到

$$f(x) = 698.5 + 0.84 \frac{L}{k} - 4.62 \times 10^{-4} \left(\frac{L}{k} \right)^2 \quad (4)$$

式中 $f(x)$ 即为换算得到的下拉杆位移, 即后犁的沟深。所以, 理论上通过控制悬挂液压油缸的伸缩量来控制沟深的调整量是可行的。

1.3 控制系统设计思路

由上述分析可知, 开沟犁的沟深与下拉杆的位置有关, 而下拉杆由拖拉机悬挂提升液压缸的伸缩量来控制, 故只需要控制液压缸的伸缩量, 就可以实现对后犁沟深的监测及自动控制。

甘蔗种植机在田间工作时, 为测得后犁的沟深, 将激光传感器安装到后犁主梁位置处, 对应测量位置如图 9 中点 A。具有良好视野, 可供激光测距传感器在有效落种空间内测得实际沟深。同时在液压油缸安装测距传感器及压力传感器, 通过分别监测油缸和后犁的位移量, 再根据后犁切深与液压压力的关系规律, 通过控制油缸伸缩量, 即可测出后犁实际的沟深调整量, 实现对沟深的实时监控。

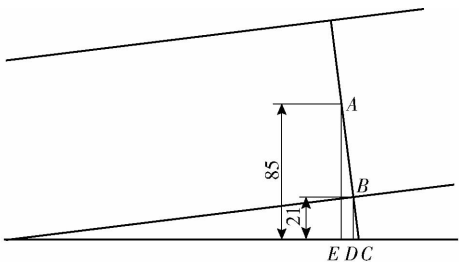


图 9 后犁沟深示意图

Fig. 9 Rear plow depth schematic

后犁沟深示意图如图 9 所示, 激光测距传感器置于点 A 处, 在种植机进行田间工作时, L_{AB} 为开沟时传感器测得后犁至外侧土堆垄顶的高度, L_{AE} 为后犁水平放置时, 传感器距开沟犁底部(沟底)高度, 传感器位置确定时 L_{AE} 为固定值, 要测得实际开沟垄深, 可用后犁高度减去开沟的垄高, 即可得到开沟后真实开沟深度。在田间反复试验测得, 在种植机开沟后后犁外侧土壤堆起高度在行进后回土(土堆塌落掉入开沟落种空间)高度小于 2 cm, 相较于甘蔗种植深度, 回土误差可以忽略。蔗种植深度的实际沟深应为 L_{BD} , 行进过程中, L_{BD} 近似为 $L_{AE} - L_{AB}$ 。故实际沟深的测量公式为

$$L_{BD} = L_{AE} - L_{AB} \quad (5)$$

当测得传感器至垄顶距离即可通过式(5)求出后犁的沟深, 因此可实现对开沟深度的实时监测与控制。

2 沟深控制系统设计

2.1 硬件设计

系统采用 STM32F103 作为主控芯片,外设有激光测距传感器、压力传感器、液压电磁换向阀等元器件。其控制系统的硬件框图如图 10 所示。

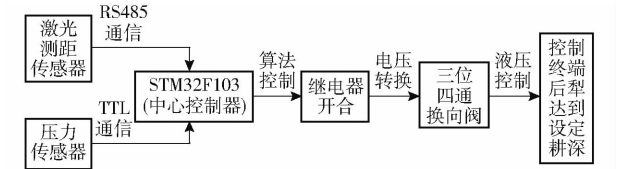


图 10 沟深测量控制系统硬件构成框图
Fig. 10 Block diagram of hardware components of tillage depth measurement control system

由于要控制后犁的沟深,需获得传感器实时检测的沟深值^[12],液压控制部分需要将原有拖拉机液压回路部分进行改装,将三位四通电磁换向阀接入原油路中,将原来双向液压控制改进成由一个三位四通电磁换向阀来控制进油回油,实现对后犁装置的提升功能,改装后的油路如图 11 所示。

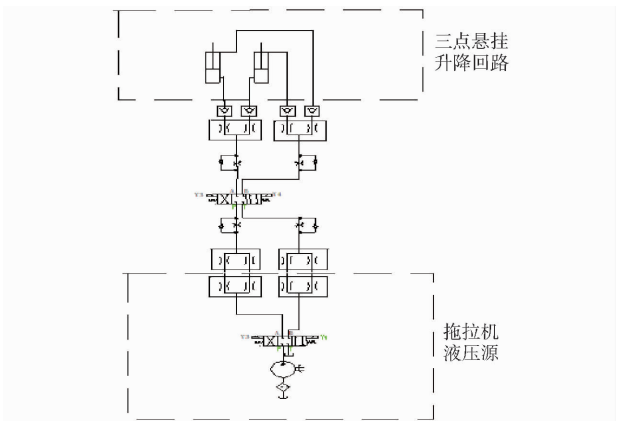


图 11 液压油路改装图
Fig. 11 Hydraulic oil circuit modification diagram

2.1.1 液压控制系统理论分析

液压回路控制系统由 1 个溢流阀和 1 个三位四通换向阀以及 2 个二位二通电磁换向阀组成。溢流阀作用是控制整个系统压力处于一定的压力范围,保证系统稳定性,二位二通换向阀起到开关的作用,控制支腿伸长和缩短的为三位四通换向阀的左位和右位,可根据控制需求改变油路方向。

溢流阀作为总开关,控制三位四通油路通断,1 个三位四通换向阀通过得失电即可控制 2 个液压缸伸缩,同时采用 2 个液压缸进油口分别安装的 2 个二位二通电磁换向阀来控制单独液压缸油路。

2.1.2 液压系统仿真

为分析油路工作状况,用 Matlab 的 Simulink 模块对液压系统进行建模仿真^[13],本文中控制目

标为雷沃拖拉机负载液压提升系统,即通过控制双液压缸驱动三点悬挂负载的提升下放,按照雷沃液压接口的特征信息在 Simulink 工程模块下选用双作用液压缸。整个液压回路的分流集流阀、节流阀以及三位四通电磁比例阀均在 Hydraulics 模块下找到对应的模块^[14]。系统仿真连接示意图如图 12 所示。

图 12 中,将三位四通电磁换向阀的出油口用分流集流阀分成 2 个出油口再分别接到 2 个油缸的回油口上,形成一个完整的回路。同时,三位四通电磁换向阀的 P 口和 T 口接在拖拉机的液压油箱上,与整机油路贯通。在仿真中,可观察到液压系统参数的变化^[15],液压位移变化如图 13 所示。在一个 4 s 的提升周期内,双作用液压缸的位移变化达到最大值,并在周期内往复运动,符合实际工作情况。

2.2 软件设计

软件系统算法是基于控制系统功能要求的基础上来开发。本文设计的甘蔗横向种植机沟深控制系统的软件部分采用模块化程序设计。整个系统划分为遥控控制模块、数据采集模块、液压动作控制模块、沟深状态监测模块等。在系统运行过程中,通过中断优先级管理,实现各部分程序运行互不影响。

沟深自动控制系统的控制原理是通过单片机采集数据,根据沟深与压力曲线模型,控制程序依据实测的压力判断开沟深度是否达到预设值,当达到预设的沟深时,则对三位四通电磁阀进行控制。当程序调用自动控制程序后,进入函数内部循环,首先判断实时沟深是否在预设值的范围内;如果后犁尚未达到设定的沟深,则根据当前后犁的沟深状态,通过控制系统不断对液压系统进行相应动态调整;如沟深已经达到预设的沟深,则控制液压系统进入稳压控制阶段,以保持沟深一致^[16]。沟深自动控制算法流程图如图 14 所示。

3 沟深控制系统试验平台搭建

在完成甘蔗种植机沟深控制系统组成及原理分析,并完成了对控制系统硬件、液压系统与软件仿真试验的前提下,需要搭建模拟沟深试验平台开展试验验证研究,对所设计的沟深控制系统控制功能进行可行性验证^[17]。

3.1 试验平台改装

由于后犁沟深控制系统主要针对田间土壤沟深监控规律的测试研究,涉及土壤试验特性,故需要搭建具有土槽的有关入土切深过程的试验测试平台,并需要测试和验证数据传输稳定性及控制效果,故

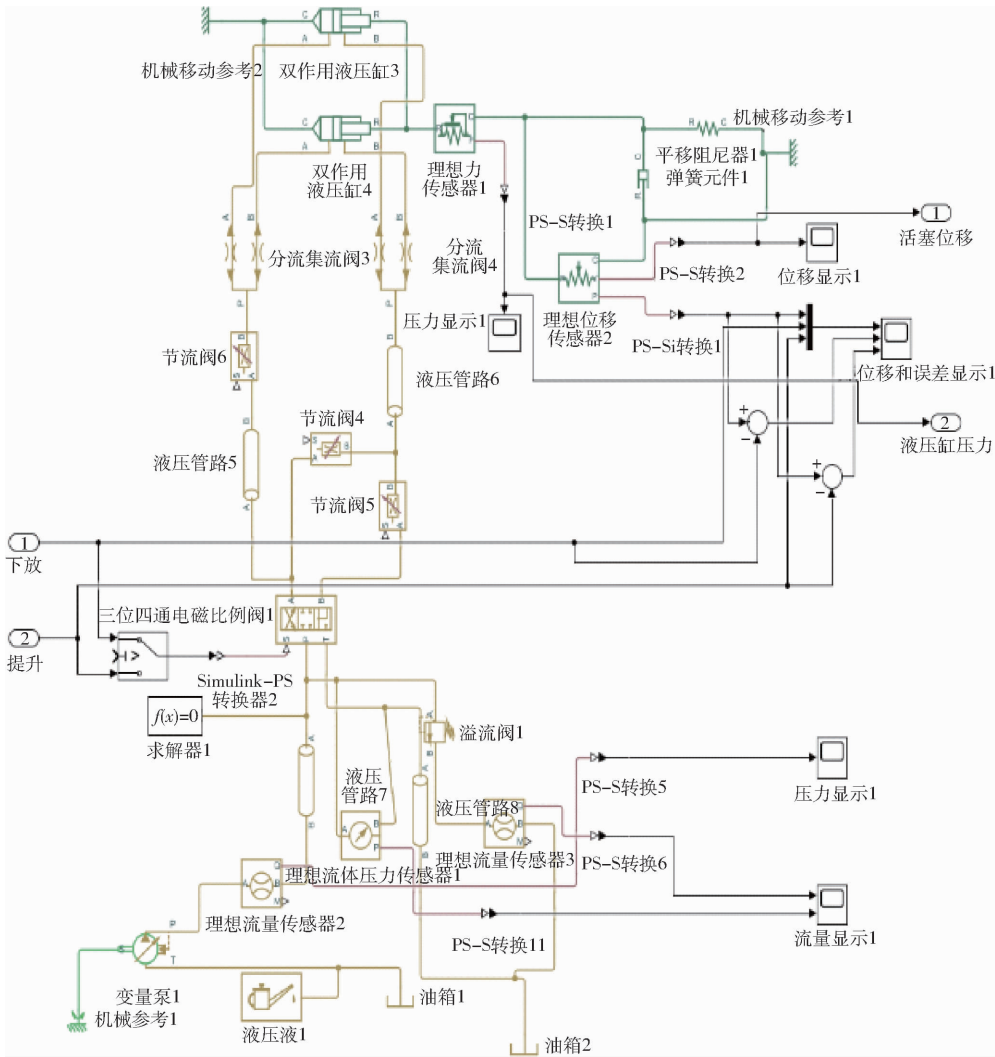


图 12 改装液压油路仿真图

Fig. 12 Modified hydraulic oil circuit simulation diagram

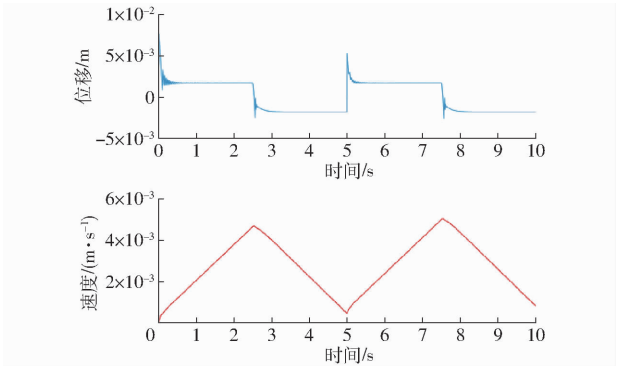


图 13 双液压缸位移和速度变化曲线

Fig. 13 Curves of double hydraulic cylinder displacement and velocity changes

采取在实验室的转运车模拟试验平台的基础上进行试验平台的改装试验验证。

转运车试验平台具有 4 个单独可进行运动控制调整的支撑油缸,具备后犁沟深试验所需的双行开沟、双液压缸驱动的基本条件,符合相似的运动及控制特性,符合后犁工作过程中,通过液压系统控制后犁升降入土的基本运动特征条件;同时该平台具有

多路三位四通电磁换向阀及单独的二位二通电磁换向阀,可用于控制改变油路方向,根据实际试验功能设计,可以只取一路三位四通电磁换向阀,在双液压缸进油口支路上,同时双液压缸各配备一个二位二通电磁换向阀,可以验证控制双液压缸升降负载运动^[18],整体的试验平台组成框图如图 15 所示。

将试验所用液压压力变送器安置于双液压缸的进油口处,用于实时检测入土压力的变化;同时还连接液压调速阀,用于验证液压流速对试验结果的影响^[19]。此外还将激光测距传感器安装在伸缩液压缸上,用于实时监测沟深的变化。将相应的引脚接口与中心控制器连接,在实验室中进行沟深测控功能试验验证,如图 16 所示。

3.2 沟深监测与控制试验

3.2.1 试验材料及器材

试验所需器材包括:研制的后犁仿形装置^[20],如图 17 所示;作为土壤容器的 40 cm × 30 cm ×

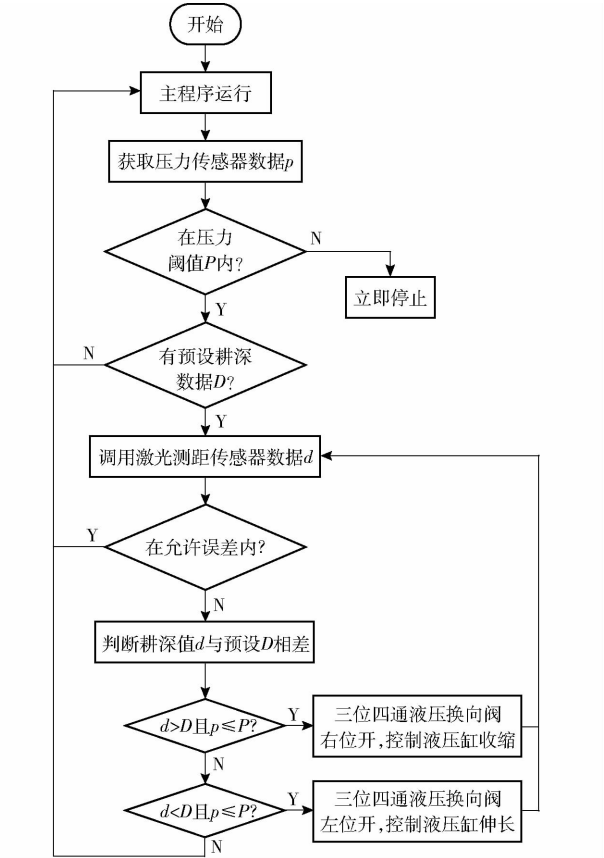


图 14 沟深自动控制算法流程图

Fig. 14 Main process of automatic tillage depth control algorithm

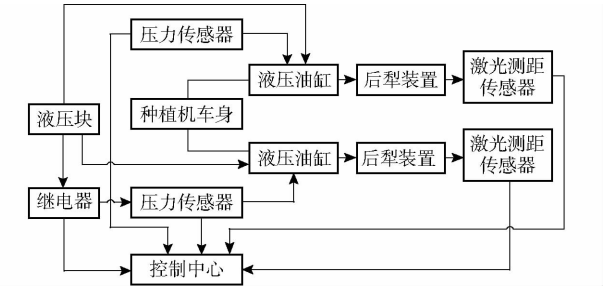


图 15 试验平台组成框图

Fig. 15 Block diagram of experimental platform

20 cm 泡沫箱一个,可以满足土壤深度为 20 cm 内的试验需求,用于模拟田间土壤情况。

试验设备包括:PC 上位机 (Snmsung500R5L)、激光测距传感器 (485 输出 + USB)、压力变送器 (PT210B)、监控系统控制板 (STM32F1)、液晶显示屏 (4.3 英寸 LCD)、农艺铲子 (DELIXI)、钢卷尺 (DL379)。

3.2.2 传感器安装

系统所需激光测距传感器安装位置如图 18a 所示,经过对实际测量位置用卷尺校准,选择将激光测距传感器安装于试验平台的单侧液压缸底座上固定,并通过串口助手将接收到的实际测量数据与卷尺数据进行比对校准;压力变送器安装于液压缸进

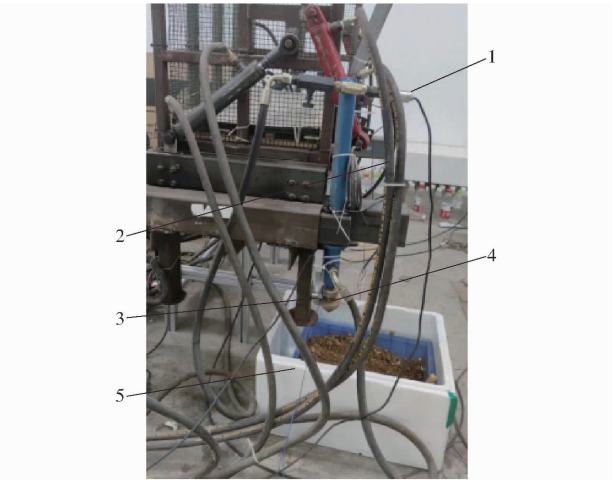


图 16 沟深控制试验平台

Fig. 16 Test platform for monitoring and control of tillage depth

1. 液压压力变送器 2. 液压油管 3. 激光测距传感器 4. 后犁仿形装置 5. 土壤容器

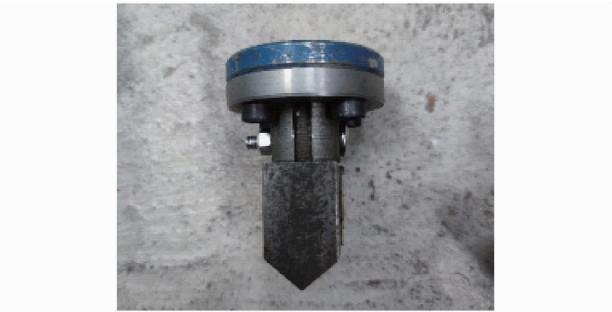


图 17 后犁仿形装置

Fig. 17 Rear plow profiling device

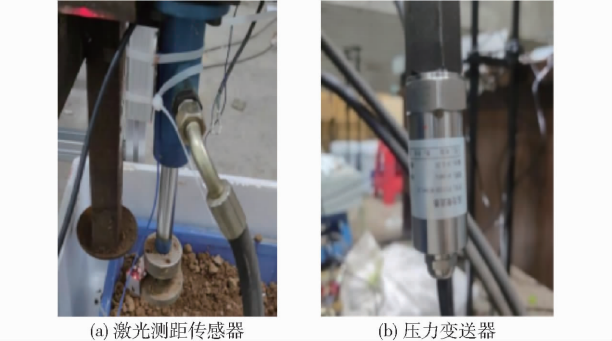


图 18 试验平台传感器安装位置

Fig. 18 Installation position of test sensors

油口处,如图 18b 所示。

3.2.3 土壤测量仪器

在性能验证试验及多因素正交试验中,需要测量土壤含水率及土壤硬度,以达到控制试验控制变量一致,选用 PH328 型土壤湿度计,可以测得土壤温度、pH 值及土壤含水率 (即土壤湿度),采用土壤硬度计,可以测得土壤下压力硬度,了解土壤情况是否适合试验条件。两个仪器均在试验前后使用,保证试验过程土壤条件稳定。

4 试验

4.1 沟深调节响应时间测试试验

为测试装置整体的设计可行情况,测试装置系统响应效果,保证检测的数据真实有效,设计系统响应时间测试试验。

4.1.1 试验方法

根据 DB45/T 2405—2021《甘蔗生产农机农艺融合技术规范》的要求,合理的沟深应为 30 cm 左右,挑选出横向种植机验收时沟深数据较差的情况作为调节深度参考,较差沟深的平均值为 18.6 cm,二者相差约 11.4 cm,故采用 10、15、20 cm 作为可能的调节值进行试验,同时根据《甘蔗生产农机农艺融合技术规范》作业土壤条件要求,控制土壤含水率为 25% 左右,响应时间计时方式为程序发出信号开始至传感器检测到设定沟深值结束。

4.1.2 试验结果分析

单片机精准地记录了控制程序控制液压缸达到设定沟深所需的时间,每组沟深测量 3 次共 9 组数据,如表 1 所示。沟深为 10~20 cm,控制系统均能在 1 s 内完成调整,满足甘蔗横向种植机在田间实时调整沟深的需求。

表 1 系统响应时间
Tab.1 System response time

沟深/cm	时间/s			
	第 1 组	第 2 组	第 3 组	平均值
10	0.983	0.991	0.981	0.985
15	0.996	0.992	0.999	0.996
20	0.998	1.000	0.999	0.999

4.2 开沟深度稳定性试验

4.2.1 试验目的

在改装的沟深监测模拟平台上进行模拟开沟试验,研究沟深自动调节装置开沟深度效果,以验证开沟调节系统稳定性能否达到种植机需求。

4.2.2 试验方法

首先在改装的试验平台上安装好沟深调节装置,并将准备好的土槽置于下方。开沟前先手动完成土壤旋耕碎土的工作,根据甘蔗种植农艺要求土壤含水率为 25% 左右,通过手动加水并晾晒的方式,保持试验土壤含水率与种植机验收时土壤含水率接近。

依据《甘蔗生产农机农艺融合技术规范》要求,种植深度合理区间为 20~30 cm,故拟采用的开沟测试深度为 20、25、30 cm,对开沟后的开沟深度进行测量,测量方式参考 NY/T 740—2003《田间开沟机械作业质量》,每组沟深测量 10 次共 30 组数据,测

量结果如表 2 所示。

表 2 沟深测量结果
Tab.2 Tillage depth measurements result cm

序号	20 cm 测量值	25 cm 测量值	30 cm 测量值
1	20.1	23.5	29.5
2	21.2	24.7	30.8
3	18.5	25.3	28.5
4	19.7	26.2	29.7
5	20.3	26.1	30.3
6	19.2	24.8	31.2
7	18.5	26.6	29.1
8	21.1	26.1	28.8
9	18.9	24.9	30.6
10	20.4	25.4	31.1
平均值	19.79	25.36	29.96

4.2.3 试验结果分析

根据表 2 所测量的沟深平均值,按照《田间开沟机械作业质量》中的公式计算开沟深度稳定性系数和开沟深度变异系数,结果如表 3 所示。

表 3 沟深稳定性系数和沟深变异系数试验结果
Tab.3 Test results of coefficient of stability of tillage depth and coefficient of variation of tillage depth

开沟深度/ cm	沟深稳定性 系数/%	标准值/ %	沟深变异 系数/%
20	92.9	80	5.1
25	96.3	80	3.7
30	96.7	80	3.3

由表 2、3 可得,当设定的开沟深度为 20 cm 时,测量的平均开沟深度为 19.79 cm,稳定性系数为 92.9%,变异系数为 5.1%;设定预期的开沟深度为 25 cm 时,测量的平均开沟深度为 25.36 cm,开沟深度稳定系数为 96.3%,变异系数为 3.7%;设定开沟深度为 30 cm 时,测得的平均开沟深度为 29.96 cm,开沟稳定性系数为 96.7%,变异系数为 3.3%。所有开沟稳定性系数均高于标准要求的 80%,设计的种植机沟深控制系统能够稳定可靠地运行。

4.3 多因素试验与优化分析

结合前面试验发现开沟深度会对沟深稳定性系数产生影响,由于甘蔗横向种植机验收时部分参考了 DB51/T 2708—2020《甘蔗种植机作业质量》标准,测定了部分土壤物理特性,包含土壤含水率、硬度、碎土率,模拟试验的土壤参考以上指标,考虑到开沟前有旋耕装置完成碎土工作,会对开沟产生影响的土壤因素只有含水率,结合实际作业中液压调速阀开度也会影响液压系统,进而对开沟产生影响,故需要对土壤含水率和液压调速阀开度对开沟的影响进行多因素试验。

利用 Design-Expert 13.0 数据处理软件,进一步探究各因素对开沟效果的影响,由于沟深稳定性系数是评价开沟效果的重要指标,因此选用其作为本次试验的重要因变量,结合上述分析,试验因素包括土壤含水率、开沟深度、调速阀开度,建立回归方程,进行三因素三水平正交旋转组合试验。正交试验因素编码如表 4 所示。正交试验设计与试验结果如表 5 所示。

表 4 正交试验因素编码

编码	因素		
	调速阀开度 A/圈	土壤含水率 B/%	开沟深度 C/cm
-1	0.5	15	20
0	1.0	25	25
1	1.5	35	30

表 5 正交试验设计与结果

序号	因素			沟深稳定性系数/%
	调速阀开度/圈	土壤含水率/%	开沟深度/cm	
1	1.0	35	20	90.65
2	0.5	15	25	94.69
3	1.5	25	30	92.98
4	1.0	15	30	94.15
5	1.5	15	25	91.96
6	1.5	25	20	91.23
7	0.5	35	25	94.19
8	1.5	35	25	91.73
9	1.0	25	25	93.16
10	1.0	25	25	93.88
11	0.5	25	20	91.87
12	1.0	15	20	91.36
13	1.0	25	25	94.15
14	1.0	35	30	94.27
15	1.0	25	25	93.97
16	0.5	25	30	95.81
17	1.0	25	25	94.63

4.3.1 沟深稳定性系数方差分析

使用 Design-Expert 软件中的 ANOVA 功能,对沟深稳定性系数进行方差分析,对回归模型中各项系数进行 F 检验,结果如表 6 所示。

由表 6 可知,沟深稳定性系数模型 P 为 0.000 6,小于 0.05,表示该模型显著,说明模型具有统计学意义,因素 A 和因素 C 的 P 分别为 0.000 3 和 0.000 1,均小于 0.01,影响极显著,而因素 B 的 P 值为 0.357 0,大于 0.05,影响不显著。即各因素对沟深稳定性系数的影响由大到小为 C 、 A 、 B 。

表 6 方差分析

差异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	33.78	9	3.75	16.75	0.000 6
A	9.37	1	9.37	41.84	0.000 3
B	0.217 8	1	0.217 8	0.972 0	0.357 0
C	18.30	1	18.30	81.67	0.000 1
AB	0.018 2	1	0.018 2	0.081 3	0.783 8
AC	1.20	1	1.20	5.35	0.053 9
BC	0.172 2	1	0.172 2	0.768 6	0.409 7
A^2	0.213 6	1	0.213 6	0.953 4	0.361 4
B^2	1.47	1	1.47	6.55	0.037 6
C^2	2.43	1	2.43	10.86	0.013 2
残差	1.57	7	0.224 1		
校正总和平方	35.34	16			

同时使用 ANOVA 功能对模型拟合优度进行方差分析,调整 R^2 为 0.898 6,是考虑自变量后的 R^2 ,表示模型拟合的数据性能良好,同时预测 R^2 为 0.752 1,表明在测试新数据时性能良好,并且预测 R^2 和调整 R^2 的差值小于 0.2,说明考虑模型中自变量的数量后,模型预测性能与拟合性能之间没有显著的影响。

4.3.2 二次响应面回归分析

根据表 6 的数据使用 Design-Expert 软件进行回归分析,选用二次项模型建立沟深稳定性系数与各影响因素间的回归模型,剔除不显著项,得到开沟深度稳定性系数 Y 对自变量二次多元回归方程为

$$Y=93.96-1.08X_1-0.17X_2+1.51X_3-0.59X_2^2-0.76X_3^2$$

(6)

式中 X_1 、 X_2 、 X_3 ——因素编码

运用 Design-Expert 中 Diagnostics 功能模块,对沟深稳定性系数进行回归模型分析,并将残差作为主要的回归诊断因素。从图 19 可以看出,数据呈线性分布,沟深稳定性系数残差符合正态分布规律;并且图 19、20 的数据分布在直线附近,具有较高的回

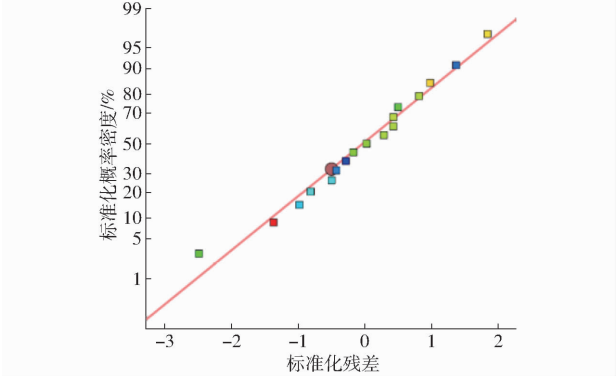


图 19 沟深稳定性系数正态分布图

Fig. 19 Plot of normal distribution of stability coefficients of tillage depth

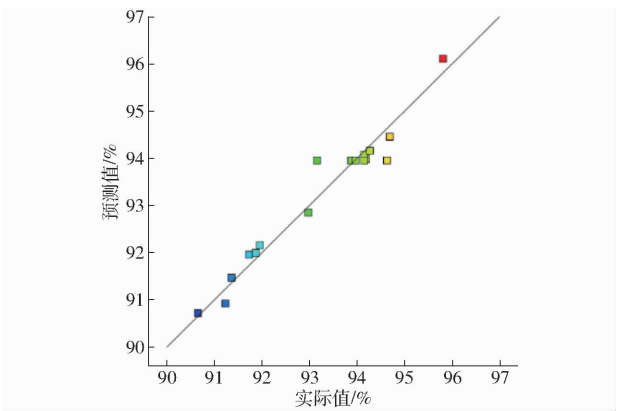


图 20 沟深稳定性系数预测散点图

Fig. 20 Scatterplot of predicted gully depth stability coefficients

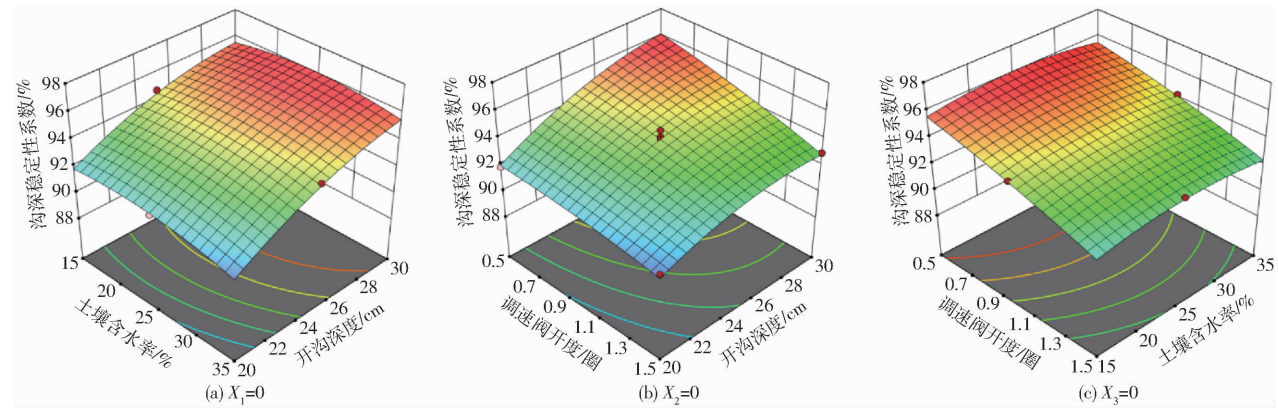


图 21 因素交互作用响应曲面

Fig. 21 Fixed response surface plot of speed regulator valve opening

度增加到最大值,调速阀开度减小至最小值时沟深稳定性系数最大。

当开沟深度固定为 25 cm 时,得到的土壤含水率与调速阀开度对沟深稳定性系数影响的响应曲面如图 21c 所示。从图中可以看出,调速阀开度对沟深稳定性系数的影响比土壤含水率更为显著,随着调速阀开度的减小沟深稳定性系数也随之增加,当调速阀开度减小到一定值时,沟深稳定性系数增加趋势变得平缓。而土壤含水率对沟深稳定性系数的影响不明显。

结合方差二次回归方程优化及响应曲面分析发现,调速阀开度较小,沟深较大时,沟深稳定性比较好,结合 Design-Expert 的数值分析模块得出当调速阀开度为 0.56 圈、土壤含水率为 27.4%、开沟深度 29.6 cm 时,能取得最好的沟深稳定性系数,为 95.87%。

5 结论

(1)根据广西地区甘蔗“双高”基地大规模种植的要求,结合广西丘陵蔗地的地形地貌与甘蔗种植机械化现状,设计了适用于甘蔗横向种植机全自动

归可靠程度。

当调速阀开度固定为 1.0 圈时,得到的土壤含水率与开沟深度对沟深稳定性系数影响的响应曲面如图 21a 所示。从图中可以看出,开沟深度对沟深稳定性系数的影响比土壤含水率更为显著,随着沟深的增加沟深稳定性系数也随之增加,当沟深增加到一定值时,沟深稳定性系数增加趋势变得平缓。

当土壤含水率固定为 25% 时,得到的调速阀开度与开沟深度对沟深稳定性系数影响的响应曲面如图 21b 所示。从图中可以看出,开沟深度对沟深稳定性系数的响应比调速阀开度更为显著,随着开沟深度的增加沟深稳定性系数也随之增加,随着调速阀开度的减小沟深稳定性系数也在减小,当开沟深

沟深控制系统,提高了甘蔗种植过程中沟深准确度与控制系统反应速度。

(2)基于甘蔗横向种植机的三点悬挂负载方式,提出了一种基于三点悬挂上拉杆运动轨迹数学模型,根据上拉杆位移变化得到相应下拉杆位移的数学模型,可间接测出沟深。

(3)根据甘蔗横向种植机械特点提出激光测距传感器与压力变送器监测沟深构想,研发了甘蔗横向种植机自动控制沟深稳定均匀的监控系统,系统响应速度均在 1 s 内,沟深稳定性系数均在 90% 以上,减少了因机手误判导致的沟深不均匀现象。为提高甘蔗种植机工作效率,采用可视化监测和人性化设定沟深系统进行自动控制,降低了人工劳动强度与操作难度。

(4)系统性能验证试验结果表明,系统响应速度及沟深调节准确度都达到了标准要求,进一步根据多因素正交试验,发现交互因素中液压调速阀开度、开沟深度均对沟深稳定性系数产生显著影响,而土壤含水率影响较小,当调速阀开度为 0.56 圈、土壤含水率为 27.4%、开沟深度为 29.6 cm 时取得最好的沟深稳定性系数,达 95.87%。

参考文献

- [1] JENSEN L D, NELSON C, LECLAIRE J P. Depth control device for planting implement; US 6701857 [P]. 2004-03-09.
- [2] WEATHERLY E T, BOWERS JR C G. Automatic depth control of a seed planter based on soil drying front sensing [J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(2): 295-305.
- [3] SUOMI P, OKSANEN T. Automatic working depth control for seed drill using ISO 11783 remote control messages [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 116: 30-35.
- [4] 周生龙. 智能农机作业数据采集终端设计与作业信息处理方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- ZHOU Shenglong. Research on data acquisition terminal design and operation information processing method of intelligent agricultural machinery operation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [5] HAN J, XIA C, SHANG G. In-field experiment of electro-hydraulic tillage depth draft-position mixed control on tractor [C]// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017.
- [6] ERIKSSON L, OKSANEN T, MIKKOLA K. PID controller tuning rules for integrating processes with varying time-delays [J]. Journal of the Franklin Institute, 2009, 346(5): 470-487.
- [7] ARVIDSSON J, WESTLIN A, SRENNSSON F. Working depth in non-inversion tillage-effects on soil physical properties and crop yield in Swedish field experiments [J]. Soil & Tillage Research, 2013, 126: 259-266.
- [8] GODWIN R J, O'DOHERTY J. Integrated soil tillage force prediction [J]. Journal of Terramechanics, 2007, 44(1): 3-14.
- [9] 张俊杰, 张西群, 马力, 等. 1GZDY-120履带自走式遥控旋耕机的设计与试验 [J]. 安徽农业科学, 2022, 50(20): 193-196.
- ZHANG Junjie, ZHANG Xiqun, MA Li, et al. Design and experiment of 1GZDY-120 crawler self-propelled remote control rotary tiller [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(20): 193-196. (in Chinese)
- [10] 朱晓龙, 迟瑞娟, 杜岳峰, 等. 高含水率玉米低损脱粒智能控制系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 9-18.
- ZHU Xiaolong, CHI Ruijuan, DU Yuefeng, et al. Design and experiment of intelligent control system for low loss threshing of high moisture content corn [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 9-18. (in Chinese)
- [11] 陈远玲, 侯怡, 金亚光, 等. 宽窄行甘蔗种植机液压系统设计与研究 [J]. 机床与液压, 2021, 49(18): 15-21.
- CHEN Yuanling, HOU Yi, JIN Yaguang, et al. Design and research on hydraulic system of wide and narrow row sugarcane planting machine [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(18): 15-21. (in Chinese)
- [12] 宋怀波, 王亚男, 王云飞, 等. 基于YOLOv5s的自然场景油茶果识别方法 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 234-242.
- SONG Huaibo, WANG Ya'nan, WANG Yunfei, et al. *Camellia oleifera* fruit detection in natural scene based on YOLOv5s [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 234-242. (in Chinese)
- [13] 李贺, 杨俊茹, 李瑞川, 等. 拖拉机深松作业关键作业参数远程监测系统研究 [J]. 农机化研究, 2022, 44(11): 240-247.
- LI He, YANG Junru, LI Ruichuan, et al. Research on remote monitoring system for key operating parameters of tractor tillage operation [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(11): 240-247. (in Chinese)
- [14] 张冲, 范旭辉, 李明森, 等. 基于EDEM的凿式犁铲土壤扰动仿真分析与试验 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊1): 52-59.
- ZHANG Chong, FAN Xuhui, LI Mingsen, et al. Simulation analysis and experiment of soil disturbance by chisel plow based on EDEM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 52-59. (in Chinese)
- [15] 李涛, 杨敏丽, 张雄, 等. 西北地区马铃薯机械化生产技术与差异性研究 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 307-313.
- LI Tao, YANG Minli, ZHANG Xiong, et al. Potato production technology and difference of mechanization level in northwest China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 307-313. (in Chinese)
- [16] 杨俊茹, 李宁, 李瑞川, 等. 基于滑模变结构的拖拉机耕深控制方法与试验研究 [J]. 农机化研究, 2022, 44(8): 238-243.
- YANG Junru, LI Ning, LI Ruichuan, et al. Research on control method and experiment of tractor plough depth based on sliding mode variable structure [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(8): 238-243. (in Chinese)
- [17] 张凯, 刘战东, 强小嫚, 等. 深松处理对豫北农田土壤水分与作物耗水的影响 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 251-258.
- ZHANG Kai, LIU Zhandong, QIANG Xiaoman, et al. Effects of subsoiling on soil moisture and crop water consumption in farmland of Northern Henan Province [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 251-258. (in Chinese)
- [18] 何永玲, 吴飞, 李尚平, 等. 甘蔗横向种植机补种系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 94-102, 138.
- HE Yongling, WU Fei, LI Shangping, et al. Design and test of replenishment system for sugarcane horizontal planter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 94-102, 138. (in Chinese)
- [19] 陈平录, 许静, 翟国敏, 等. 丘陵山区低矮树型果园立式微耕机的设计与试验 [J]. 机械设计与制造, 2021(2): 299-303.
- CHEN Pinglu, XU Jing, ZHAI Yinmin, et al. Design and experimental study of vertical micro-cultivator for low trees in hilly orchard [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(2): 299-303. (in Chinese)
- [20] 李尚平, 潘家枫, 钟家勤, 等. 基于有效落种空间的甘蔗横向种植机开沟器设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 162-170.
- LI Shangping, PAN Jiafeng, ZHONG Jiaqin, et al. Design and experiment of furrow opener for transversal sugarcane planter based on effective seeding space [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 162-170. (in Chinese)