

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.002

薯类收获机挖掘深度自动控制系统设计与试验

李涛¹ 李娜¹ 刘存根² 朱正波¹ 周进¹ 张华¹

(1. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100; 2. 山东建筑大学信息与电气工程学院, 济南 250101)

摘要: 为了提升薯类收获机械自动化水平, 提高明薯率, 降低伤薯率和漏挖率, 减小挖掘阻力, 根据垄作薯类作物种植模式, 以牵引式薯类收获机为载体, 采用传感器和微处理器控制技术, 设计了一种挖掘深度自动控制系统。该系统包括前仿形装置、挖掘机构、液压装置和控制系统。以垄沟地面为研究对象, 采用接触式深度探测机构, 其仿形深度和宽度可调节, 挖掘深度实时调整可有效实现减阻降耗。建立挖掘深度调节模型, 设计双阈值死区控制算法, 实现系统精确稳定控制, 有效避免控制信号频繁跳变和超调, 提高薯类作物收获性能指标。田间试验表明, 具有挖掘深度自动控制功能的薯类收获机其明薯率为 97.37%, 伤薯率为 1.49%, 漏挖率为 1.59%。相比采用人工收获, 其明薯率提升了 2.20 个百分点, 伤薯率降低了 1.41 个百分点, 漏挖率降低了 2.00 个百分点。

关键词: 薯类收获机; 挖掘深度; 自动控制; 传感器

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)12-0016-08

OSID:



Development of Automatic Depth Control System Employed in Potato Harvester

LI Tao¹ LI Na¹ LIU Cungen² ZHU Zhengbo¹ ZHOU Jin¹ ZHANG Hua¹

(1. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Ji'nan 250100, China

2. School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China)

Abstract: In order to improve the automation level of potato harvesting machinery, improve the potato obvious rate and reduce the injury rate and undug rate, with the traction-type potato harvester as the carrier, an automatic depth control system designed. Sensor and microprocessor control technology was used. The system included the front profiling device, the digging mechanism, the hydraulic device and the control system. Using the excavation depth real-time adjustment algorithm, the excavation depth adjustment model was established, and the precise control of the harvester excavation depth was effectively realized, and the harvest performance index of potato crops was improved. Finally, test was carried out to verify the effectiveness of the automatic depth control system. According to the growth depth of sweet potato, the initial excavation depth was 260 mm. The machine harvested six ridges with automatic depth control device and six ridges without the device. Harvest trials were performed interlaced and a total of 12 ridges were harvested for comparative test, and the harvest speed was 1.4 ~ 1.6 m/s. The test results showed that with manual depth control the average potato obvious rate was 95.17%, the average injury rate was 2.90% and the average undug rate was 3.59%. With the automatic depth control the average potato obvious rate was 97.37%, the average injury rate was 1.49%, and the average undug rate was 1.59%. Through comparison, it can be seen that after the use of automatic depth control device in the harvest process, the average potato obvious rate was increased by 2.20 percentage points, the average injury rate was decreased by 1.41 percentage points, and the average undug rate was decreased by 2.00 percentage points. Harvest performance indicators exceeded the qualified value requirements. It can be seen that after the 4UGS2 double row potato harvester was installed with the automatic deep control

收稿日期: 2020-12-02 修回日期: 2021-01-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701604-02)、国家自然科学基金项目(52005309)、山东省现代农业产业技术体系薯类产业创新团队项目(SDAIT-16-13)和山东省自然科学基金项目(ZR2019QEE035)

作者简介: 李涛(1972—),男,研究员,主要从事农作物收获及其装备研究,E-mail: 228836007@qq.com

通信作者: 朱正波(1990—),男,工程师,主要从事农作物收获及其装备研究,E-mail: 735507858@qq.com

device, it can change the excavation depth according to the change of the bottom of the ridge. The harvester can improve its operation performance index, reduce the loss in the harvest process, and thus increase the economic benefits.

Key words: potato harvester; excavation depth; automatic control; sensors

0 引言

薯类作物是土下果实非常重要的一类,主要包括马铃薯、甘薯、木薯、芋和薯蕷等^[1-2]。其中,种植面积最大的是马铃薯和甘薯,它们既是重要的粮食作物,又是重要的工业原料、蔬菜和饲料。我国虽是薯类作物生产大国,但其机械化作业程度却不高,尤其是劳动强度大、需要人工多的收获作业,机械发展严重滞后,严重制约着我国薯类产业的发展^[3-4]。

薯类作物机械化收获主要分为分段收获和联合收获 2 种方式。挖掘铲是收获机的关键部件,其挖掘深度的精确控制不仅可以提升收获性能指标,还可以减阻降耗、降低生产成本。挖掘深度控制技术有 3 种:机械式、液压式和自动控制式。目前国外的薯类机械化收获以联合收获为主,机具大型化,其对薯类作物挖掘深度自动控制系统研究较早,运用了大量高新技术,目前已开发出多种先进的机电液一体化挖掘限深技术,并朝着集成化、自动化和智能化的方向发展^[5-7]。德国 Grimme 公司生产的 GT170 型马铃薯联合收获机,采用自动控制限深技术,控制系统由仿形轮、位移传感器、液压系统和控制器等组成,具有精准度和自动化程度高、稳定性好等特点。

目前国内薯类作物机械化收获方式以分段收获为主,收获机械多为中小型。薯类收获机挖掘深度控制技术以机械式为主,即采用限深轮和挖掘铲入土角度调整机构控制挖掘深度。机械式限深轮实时仿形精度低,挖掘铲深度控制稳定性差,调整不方便。液压式和自动控制式大都处于研发试验阶段,如熊佳等^[8]采用液压限深设计了一种木薯收获机挖深液压控制系统,实时仿形性有待提高,同时由于驾驶员需要经常观察地面状况做出调整,造成操作误差和劳动强度大;南春磊等^[9]基于单片机和红外测距传感器,设计了一种挖掘深度自动控制系统,其非接触式探测机构采集信息速度快,但容易受到地面状况扰动,受温度、水分等因素影响;李涛等^[10]以垄行截面走向为研究对象,采用基于 PID 的速度控制模式实现收获机的自动对行功能,但如果垄行截面尺寸变化较大,会影响其工作稳定性,同时由于系统输出惯性会造成超调或振荡。当前,我国薯类收获机械采用的这些自动控制技术大多较为落后,已成为制约收获作业性能提高的主要瓶颈之一。

本文以自主研发的 4UGS2 型双行薯类收获机为载体,设计一种挖掘深度自动控制装置,采用接触式深度探测系统,设计仿形装置和挖掘机构,采用双阈值死区控制算法,以期实现地面高低状况自动仿形,保证实时准确地控制调整挖掘深度,提高薯类收获机作业性能指标。

1 挖掘深度控制系统总体结构与工作原理

1.1 总体结构

4UGS2 型双行薯类收获机挖掘深度自动控制系统由前仿形装置、挖掘机构、液压装置和电子控制器组成^[11-14],总体结构如图 1 所示。

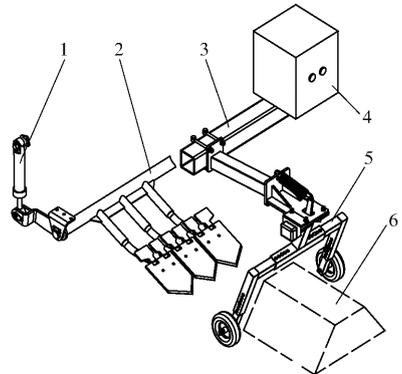


图 1 挖掘深度自动控制系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of automatic depth control system

1. 液压油缸 2. 挖掘机构 3. 收获机机架总成 4. 液压阀和控制器箱 5. 前仿形装置 6. 地垄

1.2 主要工作原理

如图 2 所示,挖掘深度自动控制系统开始工作时,前仿形装置探测垄沟起伏变化,通过其上角度传感器采集地面信息并传递给控制器,控制器通过控制算法输出液压电磁阀控制信号,液压油缸带动挖掘机构绕固定轴旋转,改变挖掘铲齿的离地高度,保证掘起土垄高度一致。同时油缸活塞杆伸缩量信息通过其位移传感器传递给控制器,控制器获取信息并根据算法实时调整挖掘铲挖掘深度,构成挖深闭环控制系统,保证挖掘深度的精确控制。

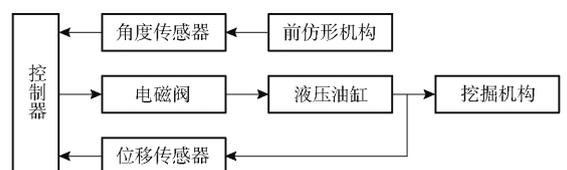


图 2 挖掘深度自动控制系统工作原理图

Fig. 2 Schematic of automatic depth control system

2 前仿形装置和挖掘机构设计

2.1 前仿形装置

前仿形装置主要功能是通过其机械装置仿形垄沟地面,同时其控制装置通过角度传感器采集地面高低状况,前仿形装置结构如图3所示。

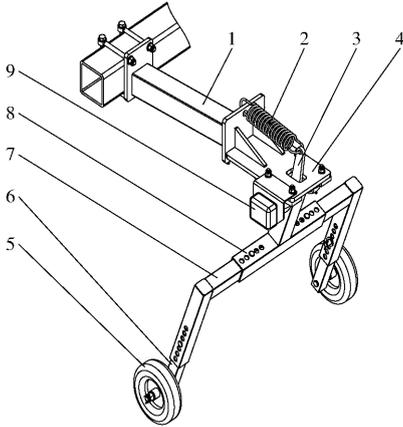


图3 前仿形装置结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of front profiling device

1. 机架连接座 2. 回位弹簧 3. 摆动臂 4. 框板 5. 前仿形轮
6. 左右轴支架 7. 左右调节架 8. 安装座 9. 角度传感器

前仿形机构后端通过螺栓与收获机机架连接,其位置可根据垄行位置左右调整。机架安装座前端由回位弹簧与摆动臂相连接,回位弹簧的预紧拉力保证前仿形轮紧贴地面,摆动臂在框板的矩形框中摆动,起到限位作用,使摆动臂在一定范围内运动,满足前仿形轮根据地面高低状况仿形的要求^[15]。

安装座横梁通过快速挂接销外套在左右调节架横梁上,安装座横梁上左右等距分布有竖直孔,可与左右调节架的单个孔配合,通过横梁上不同孔的连接,可以改变左右前仿形轮轮距,满足不同垄作植物垄距变化的需要。安装座支撑横轴轴端安装有角度传感器,角度传感器将地面高低变化信息传递给控制器。

左右调节架竖梁通过快速挂接销外套在左右轴支架竖梁上,左右调节架竖梁上下等距分布有水平孔,可与左右轴支架的单个孔配合,通过竖梁上不同孔的连接,可以调整左右前仿形轮的高低位置,满足不同地面收获要求,保证左右前仿形轮紧贴地面。

图4为前仿形机构工作示意图,仿形机构以速度 v 前进,前仿形轮沿垄底由点 A 运动到点 B ,左右轴支架可绕铰接点 O 旋转,其摆动杆与垂直面的夹角相应从 δ_0 变为 δ_1 ,则垄底高度变化量 H_2 和角度变化量 δ_2 计算式为

$$\begin{cases} H_2 = H_0 - H_1 = L(\cos\delta_0 - \cos\delta_1) \\ \delta_2 = \delta_1 - \delta_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 H_0 ——点 A 摆动中心高度

L ——摆动杆长度

δ_0 ——仿形机构工作初始角度,即点 A 摆动杆与垂直面的夹角

δ_1 ——点 B 摆动杆与垂直面的夹角

H_1 ——点 B 摆动中心高度

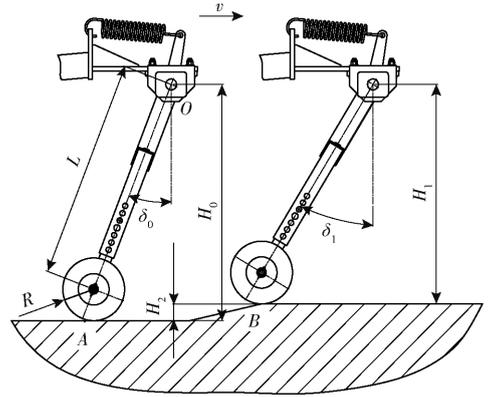


图4 前仿形装置工作示意图

Fig. 4 Working diagram of front profiling device

设计取 $L = 700 \text{ mm}$,则式(1)可简化为

$$H_2 = 700(\cos\delta_0 - \cos\delta_1) \quad (2)$$

当 $\delta_2 > 0, \delta_0 < \delta_1$,即 $H_2 > 0$ 时,表明从点 A 到点 B ,垄底位置升高,则需要减小挖掘深度;当 $\delta_2 < 0, \delta_0 > \delta_1$,即 $H_2 < 0$ 时,表明从点 A 到点 B ,垄底位置降低,则需要增加挖掘深度。

2.2 挖掘机构

挖掘机构的主要功能是根据控制器传递的挖掘深度信息,以最少的铲土量挖掘薯垄、捡拾薯块、松碎土壤,在克服阻力的基础上消耗最少的能量,并将铲起物传送到分离机构上。挖掘机构结构如图5所示^[16]。

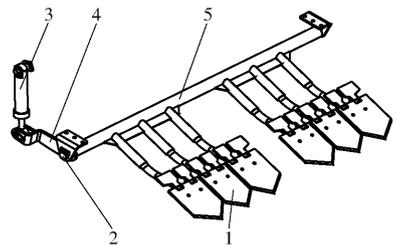


图5 挖掘机构结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of digging mechanism

1. 挖掘铲齿 2. 固定轴 3. 液压油缸 4. 连接臂 5. 铲齿架

挖掘机构中部有连接在收获机上的固定轴,铲齿架上的轴套外套在固定轴上,铲齿架可绕固定轴做旋转运动,其前端安装有挖掘铲齿,后端安装有连接臂,从而可以带动挖掘铲齿和连接臂绕固定轴做旋转运动。液压油缸缸体端连接机架安装座,活塞杆端与连接臂相连,控制器发出指令,使活塞杆伸长和缩短,从而可以实时调节连接臂的偏摆角度,保证

快速准确地调整挖掘深度^[17-18]。

挖掘机构工作过程如图 6 所示, O_1 、 O_2 和 O_3 分别为液压缸缸体端铰接点、固定轴铰接点和液压缸活塞杆端铰接点。当前仿形机构探测到垄底高度变化时, 控制器根据式(1) 计算得出垄底高度变化量 H_2 , 通过液压缸活塞杆端驱动连接臂以固定轴为中心进行旋转, 使连接臂上下摆动相应的距离, 挖掘机构工作角度, 即点 O_2 与点 O_1 的连线和点 O_2 与点 O_3 的连线之间夹角 β 变化量 β_{p1} (与前仿形机构相关) 与垄底高度变化量 H_2 可表示为

$$H_2 = \frac{\pi\beta_{p1}N_5}{180} \quad (3)$$

其中

$$\beta_{p1} = \frac{180H_2}{\pi N_5} \quad (4)$$

式中 N_5 ——点 O_2 与挖掘铲齿前端的距离

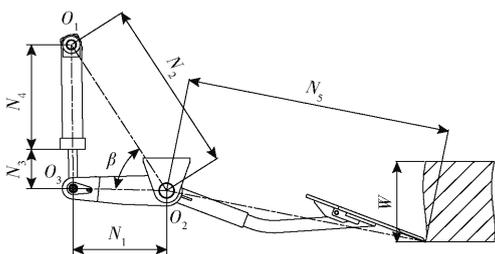


图 6 挖掘机构工作示意图

Fig. 6 Working diagram of digging mechanism

如图 6 所示, 在三角形 $O_1O_2O_3$ 中, 根据余弦定理可得到油缸活塞杆的伸出长度 N_3 与 β 的计算公式, 即

$$N_1^2 + N_2^2 - 2N_1N_2\cos\beta = (N_3 + N_4)^2 \quad (5)$$

对式(5) 移项、变换后可得

$$\beta = \frac{180}{\pi} \arccos \frac{N_1^2 + N_2^2 - (N_3 + N_4)^2}{2N_1N_2} \quad (6)$$

其中, 连接臂长度 N_1 、固定轴铰接点与油缸缸体端铰接点距离 N_2 和油缸缸体端长度 N_4 为已知尺寸, 油缸活塞杆长度 N_3 由安装在油缸上的位移传感器实时获取并传送给控制器。定义当初始挖掘深度 W_0 为 260 mm 时, β 为初始角 β_0 (取 56°), 则 β 变化量可表示为

$$\begin{cases} \beta_{p2} = \beta_1 - \beta_0 \\ \beta_p = \beta_{p2} - \beta_{p1} \end{cases} \quad (7)$$

式中 β_1 ——实时测量角

β_{p2} —— β 变化量(与挖掘机构相关), 正值和负值分别表示挖掘深度相对初始挖掘深度 W_0 减小和增大

β_p 为挖掘深度调控重要指标, 控制器比较 β_{p2} 和 β_{p1} 的数值, 根据算法确定油缸伸缩量, 实现自动挖

深功能。

同时挖掘深度 W 可表示为

$$W = W_0 + \frac{\pi\beta_{p2}N_5}{180} \quad (8)$$

薯类作物整体结薯深度在 200 ~ 350 mm 之间, 变化量在 150 mm 左右。收获机通过牵引机构连接在拖拉机上拉杆上, 收获机开始作业前, 应根据田间状况调整拖拉机下拉杆离地高度, 同时调整好仿形机构摆动杆长度 L , 这样就可以确定仿形机构工作初始角度 δ_0 和收获机初始挖掘深度。由于仿形机构和挖掘机构都位于收获机的前部, 纵向距离小, 挖掘机构可以实时根据仿形机构的角度变化做出深度调整, 同时由于收获机长度和高度相比于挖掘深度变化范围大很多, 且挖掘机构挖掘地垄后, 后面的收获机地面刮平机构可使整机在较平整的地面上工作, 所以收获机高度变化较小, 对系统工作影响较小。

3 液压装置设计

液压装置原理如图 7 所示, 自动挖掘深度控制系统启动时, 控制器输出三位四通比例电磁换向阀的控制信号, 根据前仿形机构获取的垄沟地面信息, 控制液压缸活塞杆的速度和位移, 驱动自动挖深油缸工作, 带动挖掘机构绕固定轴旋转, 改变挖掘铲齿的离地高度, 保证快速准确地调整挖掘深度。液压锁可以将油回路锁住, 以保证外界有一定载荷变化的情况下油缸活塞位置静止不动, 避免挖掘铲齿频繁上下动作。位移传感器实时获取油缸活塞杆的伸长或缩短数据并上传控制器, 控制器根据挖掘铲偏移角算法来判断挖掘机构挖掘深度是否符合要求^[19-20]。

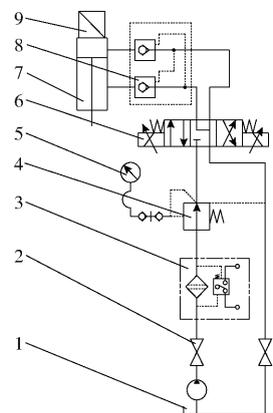


图 7 液压装置原理图

Fig. 7 Schematic of hydraulic device

1. 液压油箱 2. 阀门 3. 过滤装置 4. 减压装置 5. 压力表
6. 三位四通比例电磁换向阀 7. 自动挖深油缸 8. 液压锁 9. 位移传感器

4 电子控制器设计

4.1 硬件

薯类作物收获机电子控制器结构图如图8所示,主要由微处理器、信号处理电路、通信系统和监控终端等组成。

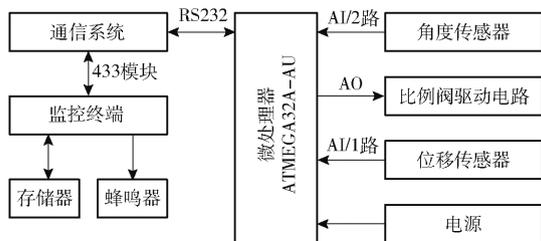


图8 电子控制器结构框图

Fig. 8 Block diagram of electronic control system

驾驶员在监控终端输入自动挖深控制指令,系统指令通过通信系统发出。微处理器首先将其转变成模拟控制信号,然后通过比例阀驱动电路驱动三位四通换向阀,使自动挖深油缸活塞杆伸长和缩短,从而控制挖掘铲的挖掘深度;同时微处理器通过角度传感器和位移传感器实时获取仿形轮支架与地面角度和挖深油缸伸缩量数据,使用垄底高度变化量算法和挖掘铲偏移角算法判断挖掘深度是否达到要求。监控终端可实时显示上传数据并存储,如果系统发生故障,可以自动声光报警^[21-24]。

4.1.1 微处理器

系统采用8位单片机作为微处理器,芯片内部集成64 KB存储器容量、2 KB EEPROM存储器容量、64 KB闪存容量、4 KB RAM、最多可使用64个IO接口、7组模数转换器输入、3组计时器、4通道PWM,最高32 MHz时钟频率,工作电压2.7~5.5 V,工作温度-40~85℃。

4.1.2 电源

微处理器主供电电源采用艾诺公司AN50系列直流稳压电源,其电压输出范围为0~35 V,采用电压模式PWM控制和IGBT高频全桥变换技术,动态响应快,过流能力强,输出纹波低。具有体积小、重量轻、噪声低、效率高、操作简单等优点,可保证相关电器设备供电稳定,满足性能测试要求。

4.1.3 角度传感器

角度传感器采用Robo Brain公司RB100系列产品,其内部集成了高精度的霍尔角度传感器。内部采用先进的磁场方向检测与转换技术,稳定可靠。检测范围0°~360°,分辨率0.022°,精度0.5%。

角度传感器输出信号为0~5 V模拟电压。如图9所示,MCP3208 A/D转换电路可实现8路模拟信号的A/D转换,信号由CH0端输入并转换为数字信号后,送入单片机进行数据处理。

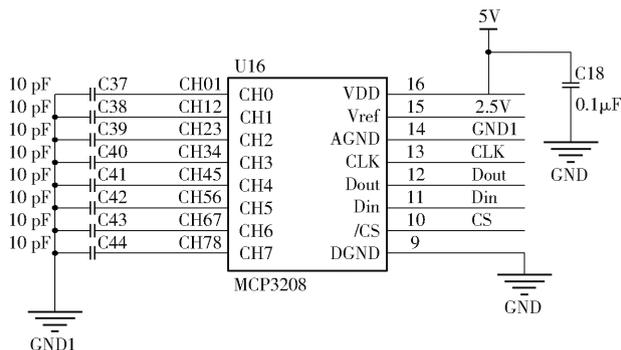


图9 A/D转换电路

Fig. 9 A/D conversion circuit

4.1.4 位移传感器

位移传感器采用Miran公司KTC系列直线位移传感器,量程为400 mm,分辨率0.01 mm,输出信号为0~5 V模拟电压,输出信号经接口电路连接到微处理器,由微处理器内部高性能A/D转换模块进行模数转换,以便微处理器进行处理分析。

4.1.5 通信系统

433模块选用SX1278射频芯片,由SEMTECH公司生产,其通信距离最大可达2~3 km,可根据实际通信距离需求调整其信号的发射功率,发射功率越大,通信距离越远,其功耗也会相应增大。本系统根据试验测试要求,选取通信距离不小于100 m,实际通信距离可达300 m以上,同时功耗较小,车载电池可连续工作12 h;该无线模块支持RS232和USB接口,可与监控终端和微处理器进行数据通信。

4.1.6 监控终端

监控终端采用LCD液晶显示屏,自行开发上位机软件,选用安卓平板计算机,操作方便。驾驶员登录后可以设置挖掘深度、作业时间等工作参数;可实时监测系统工作状态,参数可实时显示;系统出现故障时可以提供声光报警。

4.2 软件

软件采用C和C++语言编写,主要包括初始化程序、主程序和输入输出程序等。主程序包括垄底高度变化量子程序、挖深油缸控制子程序和挖掘铲摆角计算子程序等,输入输出程序可实现监控终端的初始作业参数的设定,作业过程中参数的显示、存储和导出。

为实现精确稳定控制,主程序设计了双阈值死区控制算法^[25],本软件控制的死区阈值 $\delta_2 = \pm 2^\circ$,当 $|\delta_2| \geq 2^\circ$,垄底起伏量超过 ± 10 mm,控制器才输出液压缸控制信号,调整挖掘深度。当 $|\delta_2| < 2^\circ$ 时,控制器不输出液压缸控制信号,挖掘深度维持不变。这样可以消除挖掘铲由于前仿形机构微小偏移而产生的频繁摆动,同时防止液压缸频繁动作,避免控制信号的频繁跳变,有效减少超调,提高系统稳定性和

抗干扰性。

系统软件流程如图 10 所示。首先,系统进行初始化工作,包括工作标志位置零、输入输出模块初始化和通信接口初始化。然后,根据监控终端发送的控制指令进行相应操作。如果系统发出急停指令,则停止工作并报警。如果需要参数设置,则根据挖掘深度的要求设置调整系统初始工作角 δ_0 和 β_0 。最后,发出启动命令,则程序置工作标志位为 1,系统开始实时采集工作角 δ_1 和 β_1 。根据式(1),当 $|\delta_2| \geq 2^\circ$,即挖掘深度变化超过 10 mm 时,系统开始工作,系统调用挖掘铲摆角计算子程序和挖深油缸控制子程序,调整挖掘铲入土深度。根据式(7),当 $|\beta_p| \leq 0.07^\circ$,即挖掘深度变化量比较值小于 1 mm 时,系统完成深度调整工作。如果仿形结构偏移过大,即 $|\delta_2| \geq 24^\circ$ 时,挖掘深度变化太大,容易造成零部件损坏,则系统停止工作并发出声光报警。

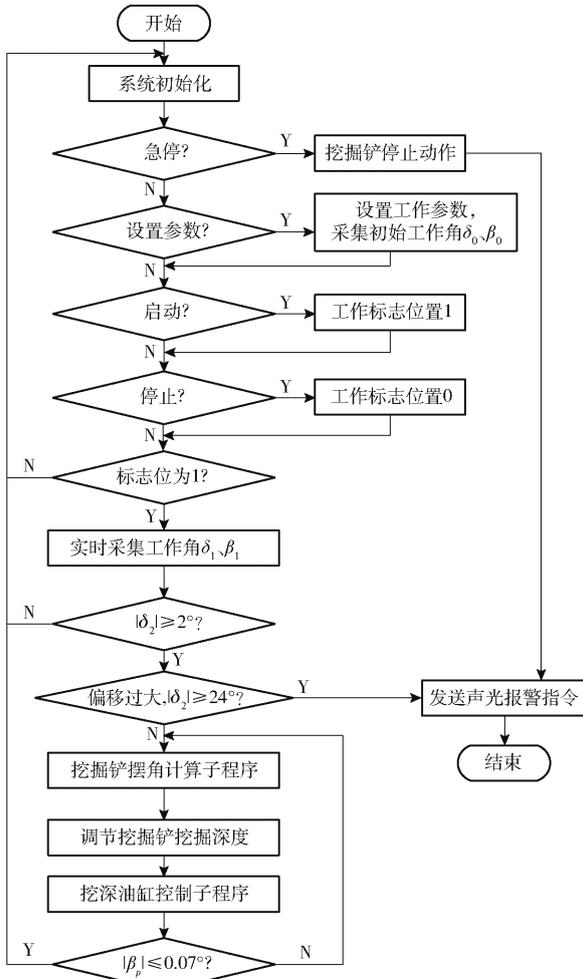


图 10 软件流程图

Fig. 10 Software flow chart

5 试验

5.1 模拟试验

采用东方红 1504 型拖拉机牵引薯类收获机,提

升悬挂装置使挖掘机构离地。软件模拟前仿形装置中的角度传感器信号输入,监测挖掘深度控制系统的动作。控制反馈信号来源于挖掘机构液压油缸上的位移传感器,经数据处理可得挖掘铲角度变化值 β_{p2} 曲线。如图 11 所示,试验模拟三角波信号输入,监测反馈信号对输入信号的跟踪。样机设计前仿形机构角度 δ 变化范围 $\pm 20^\circ$,挖掘机构角度 β 的变化范围 $\pm 10^\circ$ 。适当加大输入信号即前仿形机构角度 δ 变化范围为 $\pm 40^\circ$,则输出信号挖掘机构角度 β 变化范围 $\pm 20^\circ$ 。设置信号周期为 10 s, β_{p2} 理想工作曲线与输入信号的幅值比例由前仿形机构和挖掘机构尺寸参数决定。试验结果分析显示,三角波输入信号跟踪最大延时小于 0.4 s,最大误差为 1.8° ,平均误差为 0.3° 。

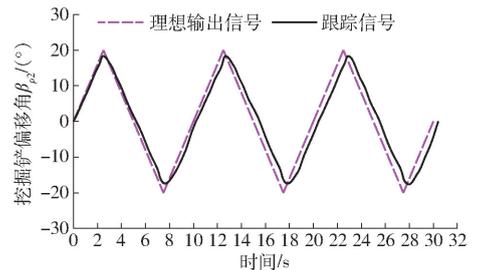


图 11 三角波响应曲线

Fig. 11 Triangular wave response curves

5.2 田间试验

5.2.1 试验条件

田间试验于 2020 年 10 月在山东省农业机械科学研究院章丘市枣园镇甘薯试验基地进行,品种为济薯 26,土壤类型为褐土,土质较黏重。试验地长 120 m,宽 60 m,面积 0.72 hm^2 。种植模式为单垄单行,株距为 210 mm,垄距为 860 mm,垄高为 240 mm,垄顶宽 250 mm,垄底宽 530 mm,甘薯秧蔓平均长度 2 100 mm,结薯深度为 240 ~ 290 mm。配套动力为东方红 1504 型拖拉机,试验前已经人工割除秧蔓。试验情况如图 12 所示。



图 12 样机和田间试验

Fig. 12 Prototype and field experiment

5.2.2 试验方法

根据甘薯结薯深度,设置初始挖掘深度为 260 mm,启动自动挖掘深度装置收获 6 垄,关闭自动挖掘深度装置固定深度收获 6 垄,交错进行收获试验,共收获 12 垄进行对比试验,收获作业速度为

1.4 ~ 1.6 m/s。每收获一垄按照标准 NY/T 1130—2006《马铃薯收获机械》测定该垄明薯率、伤薯率、漏控率指标。同时导出挖掘机构挖掘深度 W 曲线、仿形机构工作角 δ 曲线和挖掘机构工作角变化量 β_{p2} 曲线,实际测量地垄中心挖掘点曲线。

5.2.3 结果分析

地垄中心挖掘点曲线、挖掘机构挖掘深度曲线、仿形机构工作角度曲线和挖掘机构工作角度变化量曲线如图 13 所示。

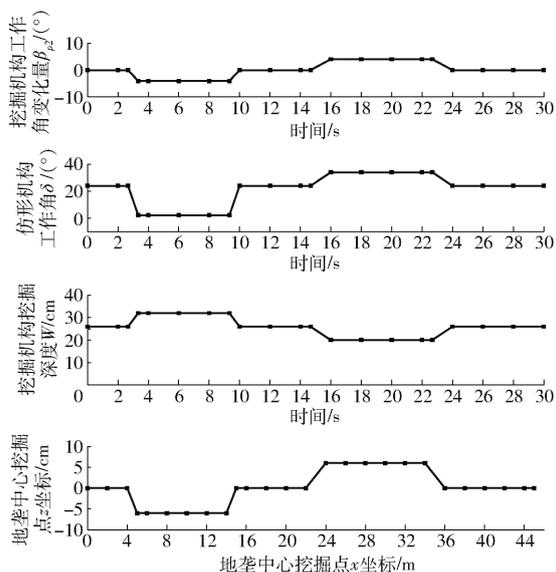


图 13 挖掘深度自动控制系统监测数据曲线

Fig. 13 Monitoring data curves of automatic depth control system

收获机根据作业工况设置初始参数,即仿形机构工作角 $\delta_0 = 24^\circ$ 和挖掘深度 $W_0 = 260$ mm,从曲线图可知,实际测量挖掘深度与系统挖掘深度变化规律一致,误差符合设计要求,仿形机构工作角 δ 和挖掘机构工作角变化量 β_{p2} 曲线变化规律符合式(2)、(7)的规定,误差范围符合设计规定。当垄底高度发生变化时,前仿形机构上的角度传感器探测垄沟起伏变化,根据控制算法驱动液压油缸,改变挖掘深度,保证掘起土垄高度一致,挖掘深度自动控制系统起到了减阻降耗的重要作用。

参 考 文 献

- [1] 杨雅伦,郭燕枝,孙君茂,等. 我国马铃薯产业发展现状及未来展望[J]. 中国农业科技导报,2017,19(1): 29-36. YANG Yalun, GUO Yanzhi, SUN Junmao, et al. Present status and future prospect for potato industry in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(1): 29-36. (in Chinese)
- [2] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴 2018[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [3] 魏忠彩,李洪文,苏国梁,等. 缓冲筛式薯杂分离马铃薯收获机研制[J]. 农业工程学报,2019,35(8): 1-11. WEI Zhongcai, LI Hongwen, SU Guoliang, et al. Development of potato harvester with buffer type potato-impurity separation sieve[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 1-11. (in Chinese)
- [4] 李涛,周进,徐文艺,等. 4UGS2型双行甘薯收获机的研制[J]. 农业工程学报,2018,34(11): 26-33. LI Tao, ZHOU Jin, XU Wenyi, et al. Development of 4UGS2 type double-row sweet potato harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 26-33. (in Chinese)
- [5] MICHAEL C. Farming 4.0 und andere anwendungen des internet der dinge[J]. Gesellschaft für Informatik, 2016, 33(1): 33-36.
- [6] OJADOS GONZALEZ D, MARTIN GORRIZ B, IBARRA BERROCAL I, et al. Development of an automatically deployable roll

试验结果如表 1 所示。通过对比可以看出,安装自动挖掘深度控制装置后,平均明薯率提升了 2.20 个百分点,平均伤薯率降低了 1.41 个百分点,平均漏控率降低了 2.00 个百分点。各收获性能指标都超过了合格值要求。由此可以看出,4UGS2 型双行薯类收获机采用该装置后,收获机可以根据垄沟高度改变挖掘深度,可提高其作业性能指标,减少收获过程中的损失,从而增加经济效益。

表 1 收获试验结果

Tab. 1 Results of harvesting test

垄序号	明薯率		伤薯率		漏控率		%
	固定深度	自动控制	固定深度	自动控制	固定深度	自动控制	
1	94.31	96.35	2.87	1.37	3.68	1.73	
2	95.12	97.27	2.94	1.45	3.23	1.86	
3	96.02	98.32	2.73	1.57	3.57	1.23	
4	95.35	97.57	3.02	1.51	3.78	1.69	
5	94.52	96.78	2.89	1.45	3.58	1.56	
6	95.68	97.80	2.97	1.56	3.71	1.46	
平均	95.17	97.37	2.90	1.49	3.59	1.59	
合格值	≥96		≤1.5		≤2		

6 结论

(1) 根据垄作薯类作物种植模式,以牵引式薯类收获机为载体,采用传感器和微处理器控制技术,设计了一种挖掘深度自动控制系统。挖掘深度控制系统调整最大延时小于 0.4 s,最大误差为 1.8° ,平均误差为 0.3° ,提高了薯类收获机械自动化水平。

(2) 设计了前仿形装置、挖掘机构、液压装置和控制系统,运用挖掘深度实时调整算法,建立挖掘深度调节模型,有效地实现收获机挖掘深度的精确控制。

(3) 薯类收获机安装了自动挖掘深度控制系统后,平均明薯率提升了 2.20 个百分点,平均伤薯率降低了 1.41 个百分点,平均漏控率降低了 2.00 个百分点,不仅减阻降耗,而且提高其作业性能指标,减少收获过程中的损失,增加经济效益。

- over protective structure for agricultural tractors based on hydraulic power: prototype and first tests [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 124(1): 46 - 54.
- [7] 陈智锴, 张冲, 胡志超, 等. 土下果实挖掘限深技术发展现状与展望 [J]. *农机化研究*, 2019, 41(1): 9 - 14, 33. CHEN Zhikai, ZHANG Chong, HU Zhichao, et al. Research status and prospects of digging depth-controlled technology for under-soil fruit [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 41(1): 9 - 14, 33. (in Chinese)
- [8] 熊佳, 廖宇兰, 吕凯英, 等. 挖拔式木薯收获机挖深液压控制装置的设计与试验 [J]. *农机化研究*, 2019, 41(6): 116 - 120, 129. XIONG Jia, LIAO Yulan, LÜ Kaiying, et al. Design and experiment of hydraulic control system for digging depth device of cassava harvester with type of digging and lifting [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 41(6): 116 - 120, 129. (in Chinese)
- [9] 南春磊, 杜文亮, 王春光, 等. 马铃薯挖掘机挖掘铲电液仿形系统的设计分析——基于 STC89C52RC [J]. *农机化研究*, 2013, 35(12): 86 - 89. NAN Chunlei, DU Wenliang, WANG Chunguang, et al. Design and analysis of potato digger digging blade electro-hydraulic profile modeling system—based on the STC89C52RC [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013, 35(12): 86 - 89. (in Chinese)
- [10] 李涛, 周进, 徐文艺, 等. 根茎类作物收获机自动对行系统设计 [J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(11): 102 - 110. LI Tao, ZHOU Jin, XU Wenyi, et al. Design and test of auto-follow row system employed in root and stem crops harvester [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(11): 102 - 110. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191111&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.011. (in Chinese)
- [11] PIJUAN J, COMELLAS M, NOGUES M, et al. Active bogies and chassis levelling for a vehicle operating in rough terrain [J]. *Journal of Terramechanics*, 2012, 49(3): 161 - 171.
- [12] BENTINI M, CAPRARA C, MARTELLI R. Harvesting damage to potato tubers by analysis of impacts recorded with an instrumented sphere [J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 94(1): 75 - 85.
- [13] 吕凯英, 廖宇兰, 益爱丽, 等. 木薯收获机挖掘铲挖深控制系统设计 [J]. *农机化研究*, 2018, 40(2): 100 - 105. LÜ Kaiying, LIAO Yulan, YI Aili, et al. Design of automatic depth-control system for digging blade of cassava harvester [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018, 40(2): 100 - 105. (in Chinese)
- [14] 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?flag=1&file_no=20200101&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.001. (in Chinese)
- [15] 山东省农业机械科学研究院. 薯类收获机挖深调控装置: 201720777221. X [P]. 2018-04-06.
- [16] 吕金庆, 田忠恩, 杨颖, 等. 4U2A 型双行马铃薯挖掘机的设计与试验 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(6): 17 - 24. LÜ Jinqing, TIAN Zhongen, YANG Ying, et al. Design and experimental analysis of 4U2A type double-row potato digger [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(6): 17 - 24. (in Chinese)
- [17] 郑媛媛, 郭栋, 王政增, 等. 马铃薯挖掘铲的改进设计与试验 [J]. *农机化研究*, 2021, 43(3): 137 - 140. ZHENG Yuanyuan, GUO Dong, WANG Zhengzeng, et al. Improved design and experiment of potato digging shovel [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2021, 43(3): 137 - 140. (in Chinese)
- [18] 邓伟刚, 王春光, 孙宏, 等. 马铃薯挖掘机挖掘铲力学模型构建 [J]. *农机化研究*, 2014, 36(1): 84 - 86. DENG Weigang, WANG Chunguang, SUN Hong, et al. The mechanical model building of the potato excavator digger shovel [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014, 36(1): 84 - 86. (in Chinese)
- [19] 游兆延, 吴努, 胡志超, 等. 土下果实收获挖掘自动限深系统设计 [J]. *中国农机化学报*, 2013, 34(3): 184 - 187, 191. YOU Zhaoyan, WU Nu, HU Zhichao, et al. Design of automatic depth-control system of underground fructification harvesting [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013, 34(3): 184 - 187, 191. (in Chinese)
- [20] 周浩, 胡炼, 罗锡文, 等. 旋耕机自动调平系统设计 [J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(增刊): 117 - 123. ZHOU Hao, HU Lian, LUO Xiwen, et al. Design and experiment on auto leveling system of rotary tiller [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(Supp.): 117 - 123. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s018&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.018. (in Chinese)
- [21] OLOFSSON J, SALOMONSSON K, JOHANSSON J, et al. A methodology for microstructure-based structural optimization of cast and injection moulded parts using knowledge-based design automation [J]. *Advances in Engineering Software*, 2017, 109(3): 44 - 52.
- [22] 王申莹, 胡志超, CHEN Charles, 等. 牵引式甜菜联合收获机自动对行系统设计 [J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(4): 103 - 112, 163. WANG Shenying, HU Zhichao, CHEN Charles, et al. Bench test and analysis on performance of autofollow row for traction sugar beet combine harvester [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(4): 103 - 112, 163. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200412&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.012. (in Chinese)
- [23] 陈智锴, 吴惠昌, 张延化, 等. 半喂入四行花生联合收获机自动限深系统研制 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(15): 10 - 18. CHEN Zhikai, WU Huichang, ZHANG Yanhua, et al. Development of automatic depth control device for semi-feeding four-row peanut combine harvester [J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(15): 10 - 18. (in Chinese)
- [24] IVANETA G, OVSYANKO V, VYRSKI A, et al. Computer modeling of beet harvester digging. Bodies-soil interaction [J]. *Journal of Research & Applications in Agricultural Engineering*, 2007, 52(1): 8 - 12.
- [25] 胡炼, 罗锡文, 赵祚喜, 等. 插秧机电控操作机构和算法设计 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(4): 118 - 122. HU Lian, LUO Xiwen, ZHAO Zuoxi, et al. Design of electronic control device and control algorithm for rice transplanter [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(4): 118 - 122. (in Chinese)