

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.011

根茎类作物收获机自动对行系统设计与试验

李 涛¹ 周 进¹ 徐文艺² 张 华¹ 刘存根³ 姜 伟¹

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

摘要: 针对国内根茎类作物收获机械自动化水平低、劳动强度大、对行功能缺失、明薯率低、伤薯率高和漏挖率高等问题,以 4UGS2 型双行薯类收获机为载体,以垄行截面走向为研究对象,综合运用机械、液压和电子控制等领域关键技术,设计了一种自动对行系统。该系统包括地垄仿形机构、牵引机构、液压系统和控制系统,采用基于 PID 的速度控制模式实现收获机作业路线实时调整,从而实现收获机行进过程中的自动对行功能,进一步提高了薯类作物收获机械自动化水平。田间收获试验表明:薯类收获机安装自动对行系统后,其平均明薯率为 97.25%,平均伤薯率为 1.44%,平均漏挖率为 1.57%。通过与人工对行收获试验对比可知,平均明薯率提升了 2.16 个百分点,平均伤薯率降低了 1.40 个百分点,平均漏挖率降低了 1.81 个百分点。

关键词: 根茎类作物; 收获机; 自动对行; PID 控制

中图分类号: S223.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)11-0102-09

Design and Test of Auto-follow Row System Employed in Root and Stem Crops Harvester

LI Tao¹ ZHOU Jin¹ XU Wenyi² ZHANG Hua¹ LIU Cungen³ JIANG Wei¹

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

2. Shandong Agricultural Machinery Test and Appraisal Station, Ji'nan 250100, China

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

Abstract: Although China is the largest country of root and stem crops production, its mechanized production technology is very backward, and the specialization, high efficiency and serialization of the working machines are still lower, which lags behind developed countries. Aiming at the extrusive problems in the domestic harvester such as low level of mechanical automation, high labor intensity, lack of auto-follow row function, low obvious rate, high injury rate and high undug rate, taking 4UGS2 double row potato harvester as the carrier and the ridge section direction as the research object, comprehensively using mechanical, hydraulic and electronic control and other key technologies, the auto-follow row device was designed, which consisted of ridge profiling mechanism, traction mechanism, hydraulic system and electronic control system. The real-time adjustment algorithm of harvester operation route was introduced based on PID control technology, and the harvester operation route adjustment model was constructed. Finally, the optimal control of track of harvester was tested to verify the effectiveness of potato harvester, which included the installation of auto-follow row device and the non-installation of auto-follow row device. The auto-follow row device was used to harvest three ridges and then relying on the tractor driver to manually match the row to harvest three ridges. The experiment was carried out by interlacing with six ridges, and the harvester speed was 5.02 km/h (i. e. 1.40 m/s). The results showed that 4UGS2 harvester exhibited better adaptation on the moist land with soft soil and less hardening, and the auto-follow row device and other parts of the machine had good working performance. The obvious rate, injury rate, undug rate and other indicators reached or exceeded the qualification requirements. According to

收稿日期: 2019-07-10 修回日期: 2019-09-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701604-02)、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)和山东省农机装备研发创新计划项目(2018YF020-05)

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

通信作者: 张华(1976—),男,高级工程师,主要从事农作物收获及其装备研究,E-mail: 358286427@qq.com

the experiment and statistics, in the three ridges with manually matching the row, the obvious rate was 95.09%, the injury rate was 2.84%, and the undug rate was 3.38%. Meanwhile, in the three ridges with auto-follow row device, the potato obvious rate, injury rate and undug rate were 97.25%, 1.44% and 1.57%, respectively. Through comparison, it can be seen that when the harvester was installed with the auto-follow row device, the obvious rate was increased by 2.16 percentage points, the injury rate was decreased by 1.40 percentage points, and the undug rate was decreased by 1.81 percentage points. Due to the installation of auto-follow row device, the harvester can automatically adjust the working posture according to the change of the ground ridge, carry on the positive excavation and realize the accurate control of the harvest operation. The potato obvious rate, injury rate and undug rate were improved simultaneously. Besides, the stability of the auto-follow row device would be affected if the ridge cross section size was changed greatly and individual collapse of the ridge occurred in the course of the test. The machine was characterized by its stable and reliable work, efficient operation and better performance index. The research can provide an effective reference for the development of intelligent harvesting technology for other root and stem crops harvesting machines.

Key words: root and stem crops; harvester; auto-follow row; PID control

0 引言

甜菜、花生、马铃薯、甘薯等根茎类作物是我国重要的经济作物,种植面积及产量均居世界首位^[1-2]。根茎类作物果实埋于地下,不同于稻麦、玉米等地上作物,收获时需要挖掘收获。挖掘收获时若挖掘铲前进方向出现偏差,就会导致漏挖、少挖,作业效率低。为了提高产量,根茎类作物主产区基本采用垄作方式,由于农艺不规范,各地垄作模式不统一,为了对行行走,相应增加了驾驶员的劳动强度。对行作业准确性易受个体因素影响,同时由于机组较长,即使拖拉机能够准确对行,也难以保证后面的收获机进行准确的对行作业。为了提高根茎类作物收获机械自动化水平和作业性能,有必要进行自动对行控制技术的研

究^[3-4]。根茎类作物自动对行收获技术按照研究对象的不同可分为两种,即以地垄为研究对象的地垄自动对行技术和以作物块根为研究对象的块根自动对行技术。目前,发达国家充分运用机、电、液一体化收获技术,已将自动对行装置产品化,并将其广泛应用到农业装备领域^[5-7]。KARTOFFEL 型马铃薯收获机使用的地垄自动对行技术,采用机械探杆采集垄的轨迹信息,通过液压控制转向装置调整行航轨迹,使挖掘铲对正。近几年,国内对根茎类作物收获机自动对行装置也有一定的研究,吴惠昌等^[8]以 TBH45T 型牵引式甜菜联合收获机为载体,运用电子控制技术构建甜菜联合收获自动对行系统;王方艳等^[9]针对圆盘式甜菜收获机的结构特点和甜菜种植方式,研制了一种机械式液压对行控制系统。国内根茎类作物收获机自动对行装置大都以作物块根为研究对象,通过导向机构与作物轮廓接触获得偏转信息,这种方式受作物的生长状况影响较大,其

适应性和可靠性还需要进一步验证。

目前,国内以地垄为研究对象的地垄自动对行技术尚不多见。本文以所研制的 4UGS2 型双行薯类收获机为载体,以垄行截面走向为研究对象,综合利用机械、液压和电子控制等技术,设计一种自动对行控制系统,以提高 4UGS2 型双行薯类收获机的作业性能。

1 结构与工作原理

1.1 系统结构

根茎类作物收获机自动对行系统由地垄仿形机构、牵引机构、液压系统和控制系统等组成^[10-12]。系统结构图如图 1 所示。

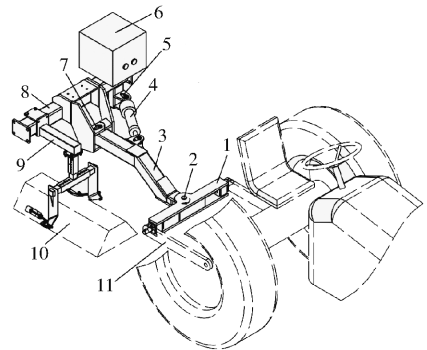


图 1 自动对行系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of auto-follow row system

- 1. 前牵引架 2. 销轴 I 3. 牵引座 4. 液压油缸 5. 销轴 II
- 6. 液压阀和控制箱 7. 销轴 III 8. 收获机机架总成 9. 地垄仿形机构 10. 地垄 11. 拖拉机上拉杆

1.2 主要工作原理

在地垄仿形机构左右连接架上各安装一个角度传感器,传感器触杆前端安装有弧形探测板。启动自动对行系统开始收获时,弧形探测板与垄侧面接触,控制器根据角度传感器输出的垄侧面偏移角度,通过 PID 速度控制算法输出液压电磁阀控制信号,

驱动液压油缸动作,带动牵引座左右移动,使挖掘位置始终对准垄的中间位置,同时集成在油缸中的位移传感器将油缸伸缩位移实时反馈给控制器,进而在人机交互界面中动态显示牵引座偏转角度,控制器根据实时检测的信号来判断牵引座偏转角度是否达到要求,构成对行闭环控制系统。自动对行系统工作原理图如图 2 所示。

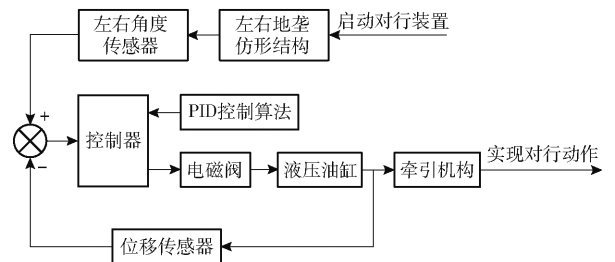


图 2 自动对行系统工作原理图

Fig. 2 Schematic of auto-follow row system

2 地垄仿形机构和牵引机构设计

2.1 根茎类作物种植模式

甜菜、花生、马铃薯、甘薯等根茎类作物多为一年一季种植,种植方式以单行垄作为主。垄作有利于作物合理密植和田间通风透光,获得高产,有利于灌溉和排水,同时垄作种植模式便于机械化收获。种植垄距 S 为 650 ~ 950 mm,株距为 150 ~ 300 mm,一般垄体高 h_1 为 150 ~ 250 mm,垄上宽 W_3 为 200 ~ 350 mm,垄下宽 W_1 为 400 ~ 600 mm,生长深度一般在 300 mm 土层以上^[13-14]。

根茎类作物种植模式如图 3 所示。其中, h_2 为弧形探测板作用高度, W_2 为弧形探测板作用宽度,即对行弧形探测板在此位置与垄侧面接触,角度传感器可实时输出垄侧面偏移角度。

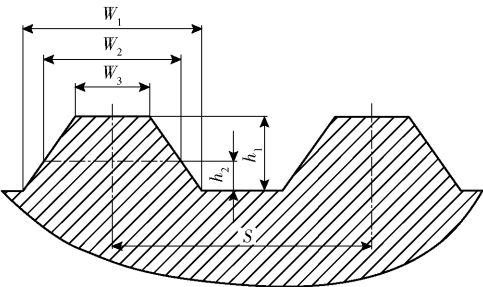


图 3 根茎类作物种植模式示意图

Fig. 3 Planting mode diagram of root and stem crops

根茎类作物整地作业一般用起垄机起垄,起垄时不仅具有较好的垄面成形能力,而且能对垄床起到很好的镇压作用;中耕作业时,中耕机在除草的同时进行培土作业,修垄效果良好。根茎类作物在收获季节时,一般地垄形状良好,为自动对行装置的顺利工作提供了良好的作业条件。

2.2 地垄仿形机构

地垄仿形机构主要功能是对垄侧面进行仿形,采集垄侧面左右偏移量信息传递至控制器,地垄仿形机构结构如图 4 所示。

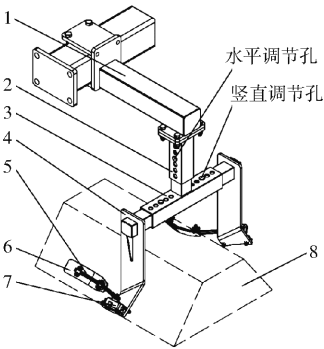


图 4 地垄仿形机构示意图

Fig. 4 Structure diagram of ridge profiling mechanism

1. 机架安装座 2. 竖支座 3. 横支座 4. 左右连接架 5. 传感器触杆 6. 弧形探测板 7. 角度传感器 8. 地垄

地垄仿形机构机架安装座通过螺栓与收获机横梁连接,其位置可根据垄行位置进行左右调整。地垄仿形机构竖支座竖梁上有一排间距相等的水平孔,横支座竖梁上分别有单个孔与之配合,竖支座竖梁外套在横支座竖梁上,通过快速挂接销轴连接,调整方便,通过竖梁上不同孔的配合,可以调整改变弧形探测板与挖掘铲的纵向距离,保证弧形探测板与地垄侧面相对位置不变,从而满足收获机不同挖掘深度的需要^[15]。

地垄仿形机构横支座横梁上左右各有一排间距相等的竖直孔,左右连接架横梁上分别有单个孔与之配合,横支座横梁外套在左右连接架横梁上,通过快速挂接销轴连接,调整方便,通过横梁上不同孔的配合,可以调整改变左右传感器座的横向距离,从而满足不同垄行截面尺寸的需要。

地垄仿形机构左右连接架上各安装一个角度传感器,传感器触杆前端通过螺栓和压板安装有弧形探测板,传感器触杆与垄侧面的安装角度可以调整,同时优化弧形探测板的几何参数,保证弧形探测板与垄侧面良好的接触^[16]。

针对个别地垄塌陷等情况,仿形机构两触杆安装到位并与垄面良好接触后,采用限位结构形成一个两触杆接触垄面距离的最小值,其值可根据垄面形状调整,因此探杆不会接触塌陷严重的垄面,同时两触杆只有沿垄侧向外摆动时,对行系统才启动工作,不会造成对行动作的误操作。

如图 5 所示,对行系统工作时,弧形探测板与地垄侧面紧密贴合,当地垄走向发生左右偏移时,弧形探测板相应从中间位置转动角度 δ ,即固定在弧形探测板上的角度传感器轴也转动了相同角度,控制

器根据偏转角度大小,采用 PID 速度控制方式调节比例换向阀的阀芯开度,控制液压缸活塞杆的速度,使牵引机构发生偏转,实现自动对行功能。

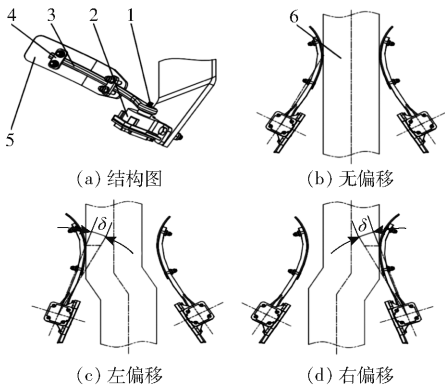


图 5 地垄仿形机构工作示意图

Fig. 5 Working diagram of ridge profiling mechanism

1. 传感器连接轴 2. 传感器座 3. 传感器触杆 4. 压板 5. 弧形探测板 6. 地垄

比例阀速度控制信号 u 为

$$u = \text{sign} \left(\left| k_p \delta(t) + k_i \int \delta(t) dt + k_d \frac{d\delta(t)}{dt} \right| \right) \quad (1)$$

其中,当左传感器触发时, $\text{sign} = 1$,当右传感器触发时, $\text{sign} = -1$, $\delta(t)$ 为左角度传感器或右角度传感器的偏移角度,是取样时间 t 的函数, k_p 、 k_i 、 k_d 分别为比例项、积分项和微分项系数。

2.3 牵引机构

牵引机构的主要功能是连接拖拉机和收获机,同时其上安装有液压系统以实现整机自动对行功能。自动对行系统以 4UGS2 型双行薯类收获机为载体,4UGS2 型薯类收获机的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 4UGS2 型薯类收获机主要技术参数

Tab. 1 Technical parameters of 4UGS2 potato harvester

参数	数值
配套动力/kW	>88
作业幅宽/mm	1 640
纯工作生产率/($\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.50 ~ 1.10
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	5 030×2 080×1 140
作业深度/mm	200 ~ 350
作业速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	3 ~ 6
结构质量/kg	1 600

如图 1 所示,牵引机构前牵引架通过左右悬挂轴分别与拖拉机三点悬挂机构下悬挂点连接,其后端通过快速挂接销轴连接收获机牵引座,牵引座后端通过销轴连接在收获机机架总成上,牵引座可以绕销轴旋转,从而控制收获机的行进路线。液压系统液压缸一端连接在机架总成上,另一端连接在牵

引座上,液压缸根据控制信号可以伸长和缩短,从而控制牵引座的左右偏摆角度,保证自动对行装置顺利工作^[17-18]。

牵引机构工作示意如图 6 所示, O_1 为油缸缸体端铰接点, O_2 为牵引座铰接点, O_3 为油缸活塞杆端铰接点, O_4 为前牵引架铰接点, L_1 为牵引座铰接点与油缸缸体端铰接点的距离, L_2 为牵引座铰接点与油缸活塞杆端铰接点的距离, L_3 为油缸活塞杆的伸出长度, L_4 为油缸缸体端长度, θ 为牵引座铰接点与油缸缸体端铰接点的连线和牵引座铰接点与油缸活塞杆端铰接点的连线之间角度。

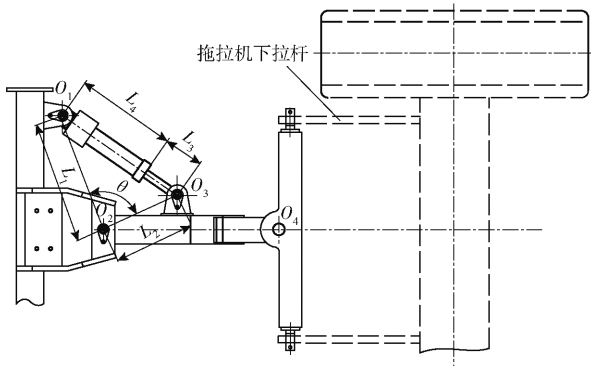


图 6 牵引机构工作示意图

Fig. 6 Working diagram of traction mechanism

当地垄仿形机构探测到垄侧面偏移时,控制器根据探测板偏转角度大小,通过液压油缸来驱动牵引座偏移,即牵引座以 O_2 为中心进行旋转,根据几何关系可求得 θ 与油缸活塞杆伸出长度 L_3 的对应关系,由三角形余弦定理可知

$$L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2\cos\theta = (L_3 + L_4)^2 \quad (2)$$

对公式(2)移项、变换后可得

$$\theta = \frac{180}{\pi} \arccos \frac{L_1^2 + L_2^2 - (L_3 + L_4)^2}{2L_1L_2} \quad (3)$$

式中, L_1 、 L_2 和 L_4 为已知数据,油缸活塞杆的实时伸出长度 L_3 可通过位移传感器及时反馈给控制器。定义当牵引座纵梁与机架横梁垂直时, θ 值为初始角,设计初始角 $\theta_i = 85^\circ$,则 θ 变化量为

$$\theta_p = \theta - \theta_i \quad (4)$$

式中 θ_p ——牵引座角度变化值, ($^\circ$)
 θ_p 为正值和负值时分别表示收获机左偏和右偏。 θ_p 为自动对行性能的重要评价指标。

3 液压系统

液压系统原理图如图 7 所示,自动对行系统工作时,控制器将指令信号由比例放大器进行功率放大后传递给比例电磁换向阀,比例阀电磁铁按比例移动阀芯的位置,即可按比例控制液流的流量和改变液流的方向,进而控制液压缸活塞杆的速度和位

移,最终实现牵引机构的偏转。即比例电磁换向阀接收到控制信号后,高压油经球阀、过滤器、减压阀和比例电磁换向阀进入液压缸活塞杆端腔体或缸体端腔体,驱动液压缸缩短或伸长完成对行动作。同时安装在液压缸上的位移传感器将油缸的缩短或伸长数据反馈给控制器,控制器根据实时检测的信号来判断牵引机构偏转角度是否达到要求,构成对行闭环控制系统^[19-20]。

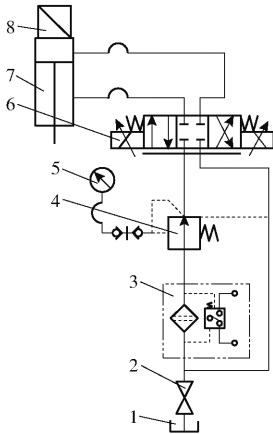


图 7 液压系统原理图

Fig. 7 Schematic of hydraulic system

1. 油箱 2. 球阀 3. 过滤器 4. 减压阀 5. 压力表 6. 比例电磁换向阀 7. 液压缸 8. 位移传感器

4 控制系统

4.1 系统结构

根茎类作物收获机控制系统结构框图如图 8 所示,分为车载控制系统、无线通信单元和监控终端 3 部分。操作人员通过监控终端输入收获机工作参数和各种控制指令,并通过 433 无线通信单元发出。车载控制系统中控制器通过 RS232 接口接收控制指令,并转换成模拟控制信号,进而通过模拟量输出接口(AO)驱动比例电磁换向阀,控制液压油缸的伸缩,从而实现牵引座的左右摆动动作,角度传感器实时测量弧形探测板是否接触田垄,并通过模拟量输入接口(AI)上传至控制器,以作为牵引座如何动作的控制依据,同时,根据油缸位移传感器测量数据,使用牵引座偏移角度算法实时计算当前偏移角度,并通过 433 无线通信单元上传至监控终端,以动态曲线方式实时显示和存储测量数据,监控终端还具有数据导出功能,方便进行数据分析,系统异常报警时(如偏移角度超过最大设定值),监控终端自动声光报警^[21-22]。

4.1.1 监控终端

监控终端选用工业级安卓平板计算机,上位机软件自行开发。操作人员登录后进入主界面可以设

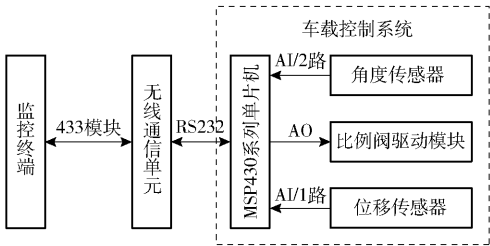


图 8 控制系统结构框图

Fig. 8 Block diagram of electronic control system

置采样周期和作业距离等工作指标;同时,可实时监测系统各工作参数,参数可绘制成动态曲线,或导出为 Excel 文件。

4.1.2 无线通信单元

433 无线射频收发模块选用 SEMTECH 公司的 SX1278 射频芯片,通信距离大于 100 m;该无线模块支持 LoRa 调制模式,具有通信范围大、抗干扰能力强、功耗低等优点。其通过 RS232 和 USB 接口分别和车载控制系统、监控终端相连,实现二者之间的数据通信。

4.1.3 车载控制器

车载控制器 MCU 采用 ATMEGA32A-AU 单片机,拥有 32KB 闪存容量,1KB EEPROM 存储器容量,32 KB 存储器容量,2KB RAM,拥有 32 个 IO 接口,7 组模数转换器输入,3 组计时器,4 通道 PWM,最高 16 MHz 时钟频率,调试接口类型包括 JTAG、SPI、USART 等类型,可工作在 2.7~5.5 V,采用 44 针脚数 QFP 封装,可在-40~85℃温度范围工作,抗干扰能力强。

4.1.4 角度传感器

角度传感器构件自主开发,输出信号为 0~5 V 模拟电压,其通过 AO-和 AO+端以差分方式接入信号调理电路,如图 9 所示,经过处理后由 CH0 端送入 MCP3208A/D 转换电路,共可实现 8 路模拟信号的 A/D 转换,转换后的数字信号直接送入微处理器进行数据处理。

4.1.5 比例电磁换向阀

比例电磁换向阀选用 VTOZ 公司的 MA-DLHZO-TES-PS-040-L71,其控制信号为 0~10 V 模拟电压。为此,设计了一款基于 LM358 的模拟电压输出电路,如图 10 所示。微处理器的模拟量输出信号经过 LM358 后转换为 0~10 V 模拟电压,从而为比例电磁换向阀提供控制信号。BAV99 用于提高控制信号的驱动能力。

4.2 软件设计

软件设计主要包括车载系统控制程序和监控终端程序。其中,车载系统控制程序采用 C 语言编写,主要包括初始化子程序、系统复位子程序、通信

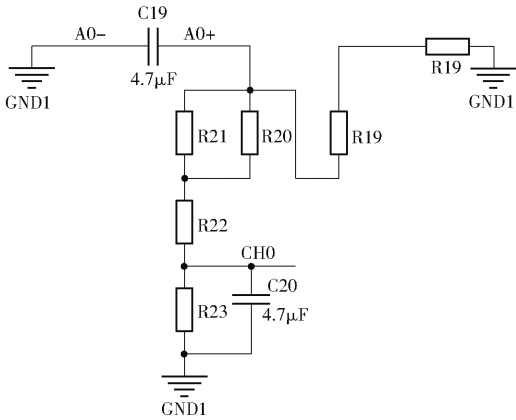


图 9 信号调理电路

Fig. 9 Signal conditioning circuit

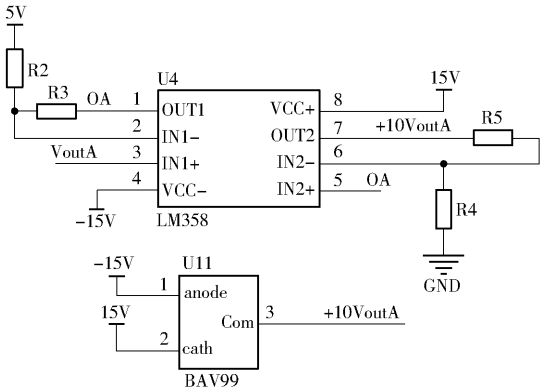


图 10 模拟量输入电路

Fig. 10 Analog input circuit diagram

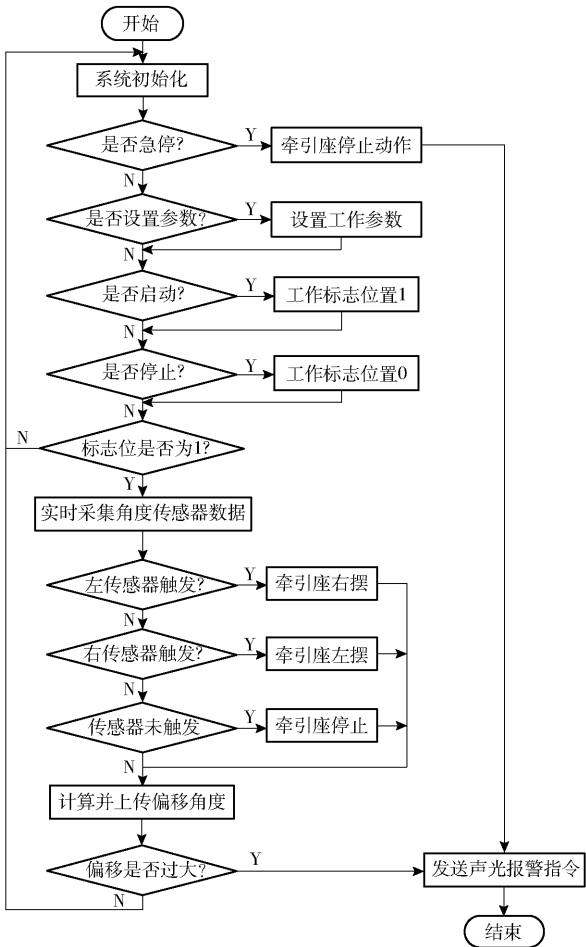


图 11 软件流程图

Fig. 11 Software flow chart

子程序、油缸控制子程序、摆角计算子程序和异常报警子程序等。监控终端程序采用 C + + 语言开发，可实现工作参数的设定、传感器信息动态曲线显示和存储、生成数据报表等功能。

车载系统控制程序软件流程图如图 11 所示。

首先，上电后，系统自动对车载控制器进行初始化，主要包括各模块（输入输出模块、RS232 接口等）参数初始化，牵引座调整居中，工作标志位置零等。然后，接收并解析控制终端发送的控制指令，从而完成相应操作。如果接收到急停指令，首先停止液压油缸动作，然后发送声光报警指令至控制终端进行报警，程序停止运行，断电检修后重新上电运行。如果接收到设置参数指令，则根据控制终端输入的参数信息进行设置，此功能在收获机开始工作前设置。如果收到启动命令，则置工作标志位为 1，系统进入工作状态，开始实时采集左右角度传感器数据，如果左传感器触发，则牵引座右摆；如果右传感器触发，则牵引座左摆；如果左右传感器均未触发，则牵引座停止动作。牵引座动作控制方式采用 PID 控制方式，当误差大于设定阈值时，只采用比例（P）控制，以提高系统的响应速度，当误差小于等于设定阈值时，加入积分（I）和微分（D）控制，从而提

高稳态误差，减小振荡。同时，根据偏移角度算法，实时计算偏移角度并上传至监控终端进行显示和存储。如果偏移角度大于设定阈值，则停止牵引座动作，程序停止运行，断电检修后重新上电运行。如果收到停止命令，则置工作标志位为 0，系统结束工作。

5 仿真试验与田间试验

5.1 仿真试验

4UGS2 型双行薯类收获机配套动力为雷沃 1804 型拖拉机，功率为 132 kW。将收获机通过牵引架连接在拖拉机悬挂机构上。根据甘薯实际种植模式和收获情况，试验模拟正弦信号输入，监测反馈信号对输入信号的跟踪。即在地垄仿形机构角度传感器上软件模拟输入正弦波信号，控制反馈信号来源于牵引机构液压油缸上的位移传感器，经数据上传可得牵引座角度变化值 θ_p 曲线，其输出信号实时反映对输入信号的动态跟踪。 θ_p 理想工作曲线与输入信号的幅值比例由仿形机构和牵引机构设计参数决定，如图 12 所示。试验结果表明，输入信号跟踪最大误差为 2°，平均误差为 0.3°，最大延迟小于 0.5 s。

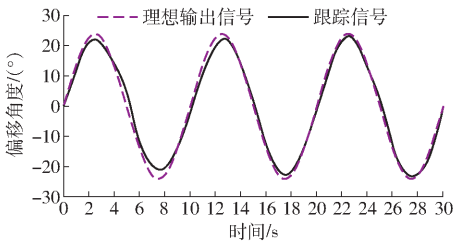


图 12 正弦波响应曲线

Fig. 12 Sine wave response curves

5.2 田间试验

5.2.1 试验条件

2018 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了田间收获试验,种植模式为单垄单行,垄距为 850 mm、收获时垄高为 250 mm,垄上宽为 220 mm,垄下宽为 500 mm,垄长度大于 100 m,品种为济薯 26 和北京 553,垄播株距为 200 mm,结薯深度为 250 ~ 300 mm,薯蔓平均长度为 2 600 mm。试验前采用人工割除方法进行藤蔓收获作业,保证试验顺利进行。样机和田间试验情况如图 13 所示。

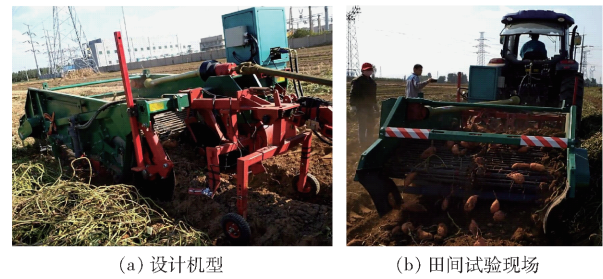


图 13 样机和田间试验

Fig. 13 Prototype and field experiment

5.2.2 试验方法

参照标准 NY/T 1130—2006《马铃薯收获机械》规定和有关农业机械试验方法,在甘薯垄播旱地进行收获试验。试验按照安装自动对行装置和不安装自动对行装置等两种状态进行。使用自动对行装置收获 3 垄,停止使用自动对行装置依靠拖拉机驾驶员人工对行收获 3 垄,交错进行,共收 6 垄进行对

比试验,收获速度为 5.02 km/h(即 1.40 m/s)。导出地垄仿形机构左角度传感器偏移角度、右角度传感器偏移角度、牵引座角度变化值 θ_p 和收获机作业轨迹曲线,实际测量地垄走向中心值曲线,分析和验证自动对行装置的工作可靠性。同时测定薯类收获机明薯率、伤薯率、漏挖率指标,考察自动对行装置及整机的性能^[23]。

5.2.3 试验结果与分析

地垄中心线走向曲线、左角度传感器偏移角度、右角度传感器偏移角度、牵引座角度变化值 θ_p 曲线和收获机作业轨迹曲线如图 14 所示。从地垄走向中心值曲线可知,实测距离 42 m,地垄在 6 ~ 12 m 处发生了左向偏离,偏移量 0.57 m;地垄在 26 ~ 32 m 处发生了右向偏离,偏移量 0.69 m;地垄其余位置未有偏移。从导出的左角度传感器摆动角度曲线可知,其摆动角度在时间 4.3 s 处发生了变化,最大偏摆角度 15°,随着对行动作的完成,探测杆复位,偏转角度逐渐变化到 0°。从导出的右角度传感器摆动角度曲线可知,其摆动角度在时间 18.5 s 处发生了变化,最大偏摆角度 18°,随着对行动作的完成,探测杆复位,偏转角度逐渐变化到 0°。由牵引座角度变化值 θ_p 曲线可知,其角度变化值在时间 4.3 s 发生了变化,正向最大偏移角度 9°,在时间 18.5 s 处再次发生了变化,负向最大偏移角度 11°。从导出的收获机作业轨迹曲线可知,其走向在时间 4.3 s 处发生了变化,最大偏移量 0.59 m;在时间 18.5 s 处发生了变化,最大偏移量 0.71 m。

由于拖拉机作业速度为 1.40 m/s,当作业时间为 t 时,其作业距离为 $1.4t$,则 5 幅曲线图的横坐标可以相对应。角度传感器探测杆长度与牵引座长度杠杆比为 0.6,角度传感器与牵引座角度变化值符合设计要求。从曲线图可知,当地垄发生左、右偏移时,则紧贴在垄侧的探测杆左、右角度传感器摆动角度发生变化,控制器采用基于 PID 的控制模式伸长或缩短油缸,则牵引座角度变大或变小,相应调整收

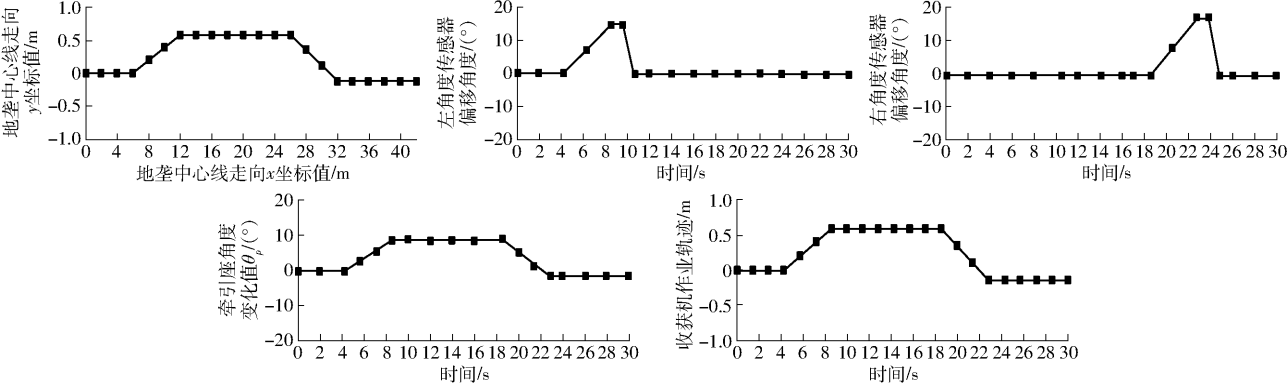


图 14 自动对行系统监测数据曲线

Fig. 14 Monitoring data curves of auto-follow row system

获机作业轨迹,实现机器自动对行功能。

4UGS2 型薯类收获机在不同试验条件下,取得的试验结果如表 2 所示。

表 2 不同试验条件下 4UGS2 型薯类收获机主要性能参数

Tab. 2 Main performance index of 4UGS2 potato harvester under different test conditions %						
垄序号	明薯率		伤薯率		漏挖率	
	人工 对行	自动 对行	人工 对行	自动 对行	人工 对行	自动 对行
1	94.24	96.23	2.92	1.45	3.56	2.25
2	96.02	98.16	2.85	1.36	3.12	0.92
3	95.02	97.35	2.76	1.52	3.46	1.55
平均	95.09	97.25	2.84	1.44	3.38	1.57
标准值	≥96		≤1.5		≤2	

试验结果表明:该机型对土质湿润、板结较少的垄作旱地适应性较好,其自动对行装置及整机各部件工作性能良好,明薯率、伤薯率、漏挖率等各项指标均达到或超过了合格要求。通过对比可以看出收获过程中采用自动对行装置后,平均明薯率提升了 2.16 个百分点,平均伤薯率降低了 1.40 个百分点,平均漏挖率降低了 1.81 个百分点。收获作业中由于安装了自动对行装置,收获机可以根据地垄行走

变化自动调整工作姿态,进行对正挖掘,实现收获作业的精确控制,从而提高明薯率、降低伤薯率和降低漏挖率,提高农户的经济效益。同时发现试验过程中如果垄行截面尺寸变化较大,会影响自动对行装置的工作稳定性。

6 结论

- (1)以 4UGS2 型双行薯类收获机为载体,以垄行截面走向为研究对象,综合运用传感器技术、液压控制技术和单片机控制技术,设计了一种自动对行控制系统。
- (2)设计了地垄仿形机构、牵引机构、液压系统和控制系统,采用基于 PID 控制技术的收获机作业路线实时调整算法,建立作业路线调节模型,实现收获机作业路线最优控制,进一步提高了薯类作物收获机械自动化水平。
- (3)田间试验表明:4UGS2 型双行薯类收获机安装自动对行系统后,平均明薯率提升了 2.16 个百分点,平均伤薯率降低了 1.40 个百分点,平均漏挖率降低了 1.81 个百分点,进一步提高了收获作业性能指标,该系统性能和可靠性指标满足设计要求。

参 考 文 献

[1] 马代夫,李强,曹清河,等. 中国甘薯产业及产业技术的发展与展望[J]. 江苏农业学报,2012,28(5): 969-973.
MA Daifu, LI Qiang, CAO Qinghe, et al. Development and prospect of sweetpotato industry and its technologies in China[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Science, 2012,28(5):969-973. (in Chinese)

[2] 韩长杰,尹文庆,杨宛章,等. 甜菜机械化收获方式分析与探讨[J]. 中国农机化,2012,23(1):71-74.
HAN Changjie, YIN Wenqing, YANG Wanzhang, et al. Analysis and discussion of sugar beet mechanization harvesting method [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2012,23(1): 71-74. (in Chinese)

[3] 万恩超,尚书旗,王东伟,等. 牵引式马铃薯联合收获机的设计与试验[J]. 农机化研究,2019,41(7):80-84.
WAN Enchao,SHANG Shuqi,WANG Dongwei,et al. Design and test of tractive potato combined harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019,41(7):80-84. (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] SAEYS W, ENGELEN K, RAMON H, et al. An automatic depth control system for shallow manure injection, part 1: modelling of the depth control system[J]. Biosystems Engineering, 2007, 98(10): 146-154.

[6] 王公仆,蒋金琳,田艳清,等. 马铃薯机械收获技术现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报,2014,35(1):11-15.
WANG Gongpu, JIANG Jinlin, TIAN Yanqing, et al. Presentstatus and prospects of mechanical potato harvest technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(1):11-15. (in Chinese)

[7] MOUSAZADEH H. A technical review on navigation systems of agricultural autonomous off-road vehicles [J]. Journal of Terramechanics, 2013, 50(3): 211-232.

[8] 吴惠昌,胡志超,彭宝良,等. 牵引式甜菜联合收获机自动对行系统研制[J]. 农业工程学报,2013,29(12):17-24.
WU Huichang, HU Zhichao, PENG Baoliang, et al. Development of auto-follow row system employed in pull-type beet combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(12):17-24. (in Chinese)

[9] 王方艳,张东兴. 圆盘式甜菜收获机自动导向装置的参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(8):27-33.
WANG Fangyan, ZHANG Dongxing. Parameter optimization and test on auto guide device for disc type sugar beet harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8):27-33. (in Chinese)

[10] 陈刚,李青龙,孙宜田,等. 玉米联合收获机自动对行控制系统的研究[J]. 中国农机化学报,2016,37(3): 191-194.
CHEN Gang,LI Qinglong,SUN Yitian,et al. Study on automatic on-line control system of corn harvester[J]. Journal of

- Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(3): 191–194. (in Chinese)
- [11] EROGLUM C, OGUT H, TURKER U. Effects of some operational parameters in combine harvesters on grain loss and comparison between sensor and conventional measurement method[J]. Energy Education Science Technology, 2011, 28(10): 497–504.
- [12] OMID M, LASHGARI M, MOBLI H, et al. Design of fuzzy logic control system incorporating human expert knowledge for combine harvester[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(10): 7080–7085.
- [13] 马标, 胡良龙, 许良元, 等. 国内甘薯种植及其生产机械[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(1): 42–46.
MA Biao, HU Lianglong, XU Liangyuan, et al. Status about sweet potato planting and its production machinery in China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(1): 42–46. (in Chinese)
- [14] 胡良龙, 田立佳, 计福来, 等. 甘薯生产机械化作业模式研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(5): 165–168.
HU Lianglong, TIAN Lijia, JI Fulai, et al. Research on the working mode of sweet potato production mechanization[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(5): 165–168. (in Chinese)
- [15] 山东省农业机械科学研究院. 薯类收获机自动对行装置: 201720777291.4[P]. 2018-04-06.
- [16] 陈刚, 孙宜田, 李青龙, 等. 玉米收获机自动对行方向自校正系统的研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(8): 191–195.
CHEN Gang, SUN Yitian, LI Qinglong, et al. Study on direction self correcting system for corn harvester automatic alignment [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(8): 191–195. (in Chinese)
- [17] 吕金庆, 孙贺, 兑瀚, 等. 双行牵引式马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(6): 98–103.
LÜ Jinqing, SUN He, DUI Han, et al. Design and experiment analysis of two-row traction potato excavator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(6): 98–103. (in Chinese)
- [18] 胡良龙, 田立佳, 胡志超, 等. 4GS-1500 型甘薯宽幅收获机的研究设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(3): 151–154.
HU Lianglong, TIAN Lijia, HU Zhichao, et al. Research design and test of 4GS-1500 type wide sweet potato harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(3): 151–154. (in Chinese)
- [19] 王申莹, 胡志超, 吴惠昌, 等. 甜菜收获机自动对行液压纠偏执行系统设计与试验[J]. 农机化研究, 2016, 38(3): 155–162.
WANG Shenying, HU Zhichao, WU Huichang, et al. Design and test of hydraulic correction execution system in automated row-followed for beet harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(3): 155–162. (in Chinese)
- [20] 李明生, 赵建军, 朱忠祥, 等. 拖拉机电液悬挂系统模糊 PID 自适应控制方法[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊2): 295–300.
LI Mingsheng, ZHAO Jianjun, ZHU Zhongxiang, et al. Fuzzy-PID self-adaptive control method in electro hydraulic hitch system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2): 295–300. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2013s255. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.055. (in Chinese)
- [21] YAHYA A, LI A, KALAKRISHNAN M, et al. Collective robot reinforcement learning with distributed asynchronous guided policy search[J]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2017, 35(3): 79–86.
- [22] 陈进, 宁小波, 李耀明, 等. 联合收获机前进速度模型参考的模糊自适应控制系统[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 87–91, 86.
CHEN Jin, NING Xiaobo, LI Yaoming, et al. A fuzzy adaptive control system of forward speed for combine harvester based on model reference[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 87–91, 86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141014&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.014. (in Chinese)
- [23] 全国农业机械标准化技术委员会. NY/T 1130—2006 马铃薯收获机械[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.