

# 牵引式甜菜联合收获机自动对行系统研制

吴惠昌, 胡志超\*, 彭宝良, 顾峰玮, 王海鸥, 王伯凯

(农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

**摘要:** 为了提高甜菜联合收获自动化水平、降低收获损失, 该文结合垄作甜菜种植模式, 以牵引式甜菜联合收获机为载体, 采用液压技术、传感器信号采集技术和微处理器控制技术设计了一套甜菜联合收获机自动对行控制系统。该系统具体包括对行探测机构、偏移牵引调整机构、液压控制系统、电子控制系统和控制软件。标准信号跟踪试验显示, 跟踪最大延时小于1 s, 超调量小于15%, 最大误差为2.5°, 表明系统具有快速响应特性和稳定性。田间收获对比试验显示, 采用该自动对行控制系统后, 甜菜联合收获机漏挖损失率降低2.03%, 根体折断率降低1.48%, 根块损伤率降低2.64%。该研究可为其他土下果实收获机械对行系统研发提供有效借鉴。

**关键词:** 农业机械, 自动化, 传感器, 甜菜联合收获机, 自动对行

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.12.003

中图分类号: S24; S225.7<sup>+</sup>2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-12-0017-08

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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(12): 17-24. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

甜菜是中国主要糖料作物之一, 其制糖量占中国糖总产量的17%左右<sup>[1]</sup>。甜菜收获季节性强, 中国仍以人工作业为主, 存在劳动强度高、效率低、收获损失大和占用农时多等问题。机械化联合收获是甜菜收获的必然发展趋势, 但目前中国性能先进和智能化程度较高的甜菜联合收获设备主要是以国外进口为主, 国产甜菜联合收获设备目前还处于样机研发阶段, 与国外先进技术还有很大差距<sup>[2-3]</sup>。

自动对行是甜菜联合收获的关键作业环节, 也是影响甜菜收获作业质量和效果的关键技术。国内外科研人员在农业机械自动控制方面已经做了大量研究, 如播种机开沟深度、播种深度和施肥深度自动控制系统<sup>[4-8]</sup>、农业机械自动转向控制系统<sup>[9-11]</sup>和拖拉机自动转向行走等方面研究取得了很大进展<sup>[12-16]</sup>。而中国在甜菜联合收获自动对行系统研究上还是空白, 这大大影响了国产甜菜收获设备的自

动化程度和作业水平。本文以日本东洋农机株式会社的TBH45T型牵引式甜菜联合收获机为载体, 融入现代微电子、液压和智能控制等先进技术, 设计液压驱动、角度传感器和微处理器数据处理等硬件和软件模块, 构建甜菜联合收获自动对行系统, 以期为提高甜菜联合收获机械的作业效率和质量、降低操作者的工作强度提供一种有效方法。

## 1 机械系统设计

### 1.1 对行探测机构

利用四连杆机构工作原理<sup>[17-18]</sup>, 设计的对行探测机构如图1所示, 具体原理如下: 探测杆6感知甜菜根块的左右偏移, 并带动挂杆4的随动偏移, 固定在挂杆上的角度传导组件7将挂杆4的偏移转换为角度传感器8旋转轴角度的变化, 角度传感器8将旋转角度的变化量转换成数字信号, 并传输至控制器。

由图2对行探测动作示意图中可以看出, 当甜菜根块偏移量 $L < (d_2 - d_1)/2$ 时, 对行探测机构不响应甜菜根块的偏移, 这有利于消除对行探测机构因甜菜根块微小偏移而产生的频繁摆动, 从而避免后续控制信号的频繁跳变; 当甜菜根块偏移量 $L \geq (d_2 - d_1)/2$ 时, 将使角度传感器旋转轴产生 $\beta$ 的旋转角度, 控制器根据角度传感器输出的 $\beta$ 值, 依据式(1)可以近似计算出甜菜根块偏移量 $L$

$$L \approx \frac{\pi\beta R}{180} + \frac{d_2 - d_1}{2} \quad (1)$$

收稿日期: 2012-12-19 修订日期: 2013-05-23

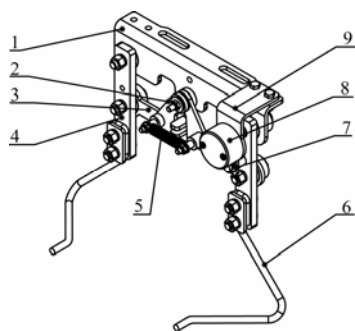
基金项目: 农业部948引进重点项目(2011-G10)

作者简介: 吴惠昌(1973—), 男, 江苏扬州人, 助理研究员, 主要从事农业生产装备智能化的研究。南京 农业部南京农业机械化研究所, 210014。Email: huichangwu@126.com

\*通信作者: 胡志超(1963—), 男, 陕西蓝田人, 研究员, 中国农业工程学会高级会员(E041200498S), 主要从事农作物收获及产后加工技术装备的研究。南京 农业部南京农业机械化研究所, 210014。

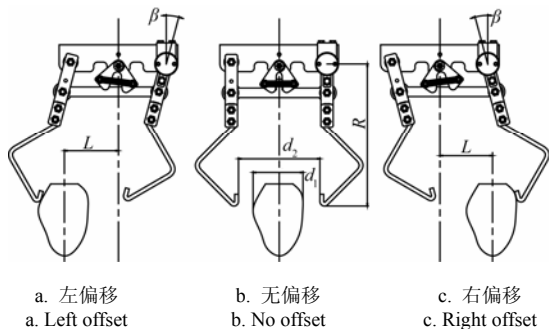
Email: nfzhongzi@163.com

式中,  $\beta$  为角度传感器旋转轴转动角度, 具有方向性, ( $^{\circ}$ );  $L$  为甜菜根块偏移量, mm;  $d_1$  为甜菜根块直径, mm;  $d_2$  为两侧探测杆间距, mm;  $R$  为探测杆摆动半径, mm。



1. 安装基座 2. 限位板 3. 随动连杆 4. 挂杆 5. 限位弹簧 6. 探测杆 7. 角度传导组件 8. 角度传感器 9. 传感器安装座  
1. Mounting base 2. Restrictor plates 3. Follower link 4. Hanging rod 5. Limit spring 6. Detection lever 7. Angle conduction module 8. Angle sensor 9. Sensor mount

图 1 对行探测机构结构图  
Fig.1 Diagram of row detection mechanism



a. 左偏移 a. Left offset  
b. 无偏移 b. No offset  
c. 右偏移 c. Right offset  
注:  $\beta$  为角度传感器轴转动角度, ( $^{\circ}$ );  $L$  为甜菜根块偏移量, mm;  $d_1$  为甜菜根块直径, mm;  $d_2$  为两侧探测杆间距, mm;  $R$  为探测杆摆动半径, mm。  
Note:  $\beta$  is the angle of angle sensor axis rotated, ( $^{\circ}$ );  $L$  is the offset of beet root, mm;  $d_1$  is the diameter of beet root, mm;  $d_2$  is the spacing of both sides detection rod, mm;  $R$  is the radius of detecting rod swing, mm.

图 2 对行探测动作示意图  
Fig.2 Diagram of row detection action

根据种植田块实地测量数据分析整理, 设计选取  $R=360$  mm,  $d_2=250$  mm,  $d_1$  在计算时甜菜根块直径选取平均值  $120$  mm<sup>[19]</sup>, 因此式 (1) 可以简化为

$$L = 6.28\beta + 65 \quad (2)$$

### 1.2 对行机构工作原理

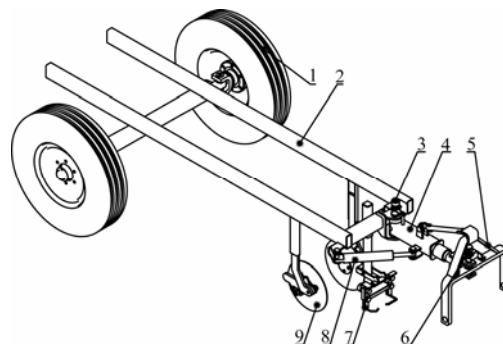
本设计以牵引式甜菜联合收获机为载体, 牵引式甜菜联合收获机的主要组成部分和性能参数如表 1 所示。

图 3 为本设计牵引式甜菜联合收获机的主机架与牵引结构简图。启用自动对行功能前, 操作人员手动调整左右圆犁刀 9 的挖掘位置, 使之对准垄顶两侧, 然后启动自动对行控制系统开始收获。控制器根据自动对行探测机构 7 输出的甜菜根块偏移量角度参数, 输出液压电磁阀控制信号, 驱动液压缸 8 的动作。液压缸 8 带动牵引杆 4 的左右移动, 使

挖掘位置始终对准甜菜根块的位置, 实现甜菜联合收获机的自动对行功能。

表 1 主要部件及性能参数  
Table 1 Major components and performance parameters

项目	Item	设计值	Design value
行走型式		1 轴 2 轮式	
适应行距/mm		500~700(可调)	
作业幅宽/mm		1 000~1 400(可调)	
切顶机构型式		仿形防堵切顶	
茎叶处理机构型式		三组橡胶打杆	
清理机构型式		前清理器+后清理器	
挖掘机构	型式	两点叉式	
	挖掘器前开口/mm	350	
	挖掘深度/mm	0~180(可调)	
根块	型式	扣接链杆+辅助输送带	
拣拾	拣拾幅宽/mm	350	
清理机构	与水平夹角/ $^{\circ}$	25	
	离地间隙/mm	345	
分离升运机构	型式	鼠笼滚筒+杆式输送链	
	作业幅宽/mm	500	
	与水平夹角/ $^{\circ}$	90	
集箱	型式	液压翻斗式	
	容积/ $m^3$	5.8	
	作业速度/ $(m \cdot s^{-1})$	0.5~1.8	
	生产效率/ $(hm^2 \cdot h^{-1})$	0.12~0.36	



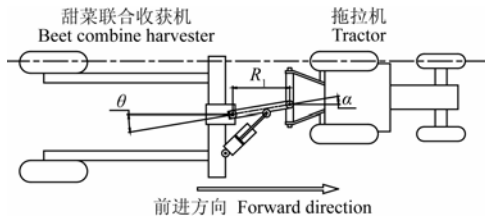
1. 行走轮 2. 主机架 3. 后角度传感器 4. 牵引杆 5. 三角牵引架 6. 前角度传感器 7. 对行探测机构 8. 液压缸 9. 圆犁刀  
1. Walking wheel 2. Main frame 3. The back angle sensor 4. Drawbar 5. Triangular traction frame 6. The front angle sensor 7. Row detection mechanism 8. Hydraulic cylinder 9. Round coulter

图 3 主机架与牵引机构简图  
Fig.3 Diagram of main frame and traction mechanism

自动对行动作示意如图 4 所示, 理想收获条件下牵引拖拉机沿直线行走, 牵引杆与前进方向的夹角为  $\alpha$ , 且  $\alpha=\theta$ , 牵引杆在前进方向上的长度为  $R_1$ 。当对行探测机构探测到甜菜根块的偏移, 控制器根据式 (2) 计算得出偏移量  $L$ 。为了顺利收获, 控制器必须通过动作液压缸, 使主机架带动挖掘圆犁刀向同方向偏移相同的距离。控制器根据偏移角  $\alpha$  的变化量  $\Delta\alpha$  计算主机架的偏移量。 $\Delta\alpha$  的数值由前角度传感器 10 (见图 4) 提供。甜菜根块偏移量  $L$  与  $\Delta\alpha$  的对应关系如式 (3) 所示

$$\Delta\alpha = \frac{180L}{\pi R_1} \quad (3)$$

式中,  $\Delta\alpha$  为前角度传感器角度变化量, 具有方向性, ( $^\circ$ );  $R_1$  为牵引杆在前进方向上的长度, mm。



注:  $\alpha$  为前角度传感器输出, ( $^\circ$ );  $\theta$  为后角度传感器输出, ( $^\circ$ );  $R_1$  为牵引杆在前进方向上的长度, mm。

Note:  $\alpha$  is the angle of front angle sensor output, ( $^\circ$ );  $\theta$  is the angle of back angle sensor output, ( $^\circ$ );  $R_1$  is the length in the forward direction of the drawbar, mm。

图 4 自动对行动作示意图

Fig.4 Diagram of auto-follow row action

## 2 控制系统设计

### 2.1 甜菜种植模式

垄作是中国北方中肥田和肥水地的一种种植方式。在地势平坦、土层深厚、排灌条件齐全的大田, 垄作有利于根茎类作物合理密植和田间通风透光, 获得高产。在中国甜菜主产区大多都采用垄作方式。

甜菜的垄作模式大多采用单垄单行。理论上垄距 600 mm 与株距 250 mm 的种植群体是甜菜高产高糖的最佳群体结构<sup>[20-21]</sup>, 但根据新疆和内蒙等地区种植田块实地测量, 参数差距非常大, 垄距范围为 550~730 mm, 株距范围为 170~330 mm, 甜菜根块偏离中心线范围为 90~130 mm (测量区域长度 2 m)。为了提高联合收获机的适应性和工作效率, 自动对行系统设计要充分考虑到甜菜种植特点。

### 2.2 系统结构与工作原理

自动对行系统结构框图如图 5 所示。对行探测机构感知垄顶甜菜根块的位置, 将根块偏移挖掘前进轨迹的偏移量转换为角度传至角度传感器 1。角度传感器 1 将角度信息转换为数字信号发送至控制器, 控制器分析处理角度信号后输出电磁阀的控制信号, 打开液压缸驱动油路, 液压缸驱动牵引偏移机构, 带动挖掘位置的调整。安装于牵引偏移机构上的角度传感器 2 将已调整角度信号反馈至控制器, 控制器实时调整输出控制信号, 确保挖掘前进路线始终与垄上甜菜根块排布一致, 使整个控制系统形成闭环反馈系统<sup>[22-24]</sup>。

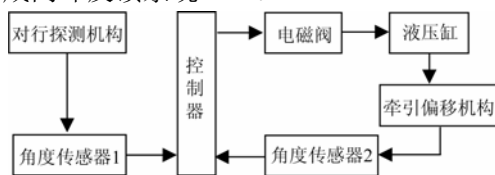
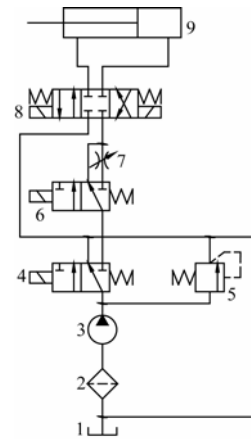


图 5 自动对行系统结构框图

Fig.5 Block diagram of auto-follow row system

## 3 液压控制系统设计

液压控制系统原理图见图 6 所示, 三位四通电磁换向阀 8 为主要控制装置, 液压缸 9 为执行装置。当控制器接收到对行探测装置的甜菜偏移信号后, 首先输出二位三通电磁换向阀 4 的控制信号, 使高压油进入控制油路。再根据偏移方向输出三位四通电磁换向阀 8 的控制信号, 对挖掘位置进行调整纠偏。加入溢流阀 5 是为了油路安全和油压的稳定<sup>[25-27]</sup>。甜菜根块偏移量不同, 液压缸 9 的调整量和调整速度也不相同, 所以增加节流阀 7 和二位三通电磁换向阀 6, 当需要精确调整时, 导通二位三通电磁换向阀 6 的控制线圈供电, 使高压油通过节流阀 7 供给三位四通电磁换向阀 8, 使液压缸 9 动作平稳精确。



1. 油箱 2. 过滤器 3. 液压泵 4、6. 二位三通电磁换向阀 5. 溢流阀 7. 手动节流阀 8. 三位四通电磁换向阀 9. 液压缸  
1. Tank 2. Filter 3. Hydraulic pump 4, 6. Electromagnetic direction valve 5. Flood valve 7. Manual throttle 8. Electromagnetic direction valve 9. Hydraulic cylinder

图 6 液压控制系统原理图

Fig.6 Schematic diagram of hydraulic control system

## 4 电子控制系统设计

### 4.1 硬件设计

电子控制系统硬件设计原理框图如图 7 所示。从图中可以看出, 电子控制系统由主控制器和手持操控器组成, 两者之间通过 RS485 总线进行通讯, 交互控制信息和控制命令。

#### 4.1.1 微处理器

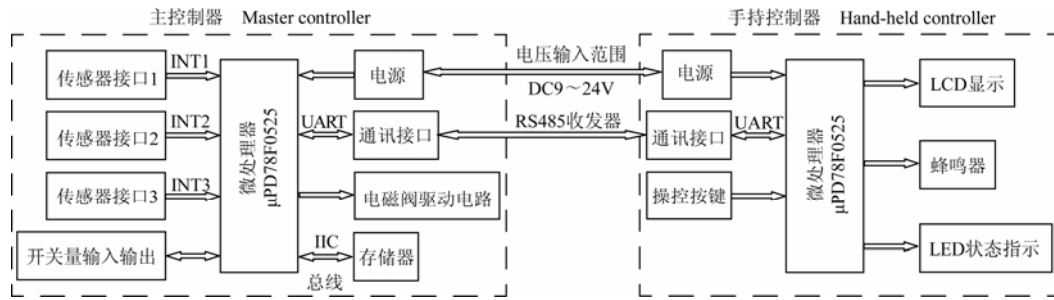
主控制器和手持操控器的微处理器均采用 NEC 公司的 78K0/LD2 系列 8 位单片微处理器  $\mu\text{PD78F0525}$ <sup>[28]</sup>, 芯片内部集成 60KB FLASH 程序存储空间、1KB 内部高速 RAM 和 1KB 外部扩展 RAM, 最多可以使用 45 个 I/O。芯片资源满足设计需求。

#### 4.1.2 电源

为了适应不同牵引拖拉机的电源输出, 主控制

器和手持操控器的主供电电源部分均采用 ZLG 公司宽压输入隔离稳压单输出 DC-DC 电源模块，分

别为 ZY\_UHBD-6W\_DS 和 ZY\_UHBD-3W\_DS，其电压输入范围为 9~24VDC，输出 5VDC。



注：INT1~INT3 为外部中断输入口。  
Note: INT1~INT3 is the external interrupt input.

图 7 电子控制系统原理框图  
Fig.7 Block diagram of electronic control system

通讯接口部分电源直接由拖拉机输出通过三端稳压管 LM78M05 稳压得到，可向接口电路提供 500 mA 的 5V 直流电源。

#### 4.1.3 存储器

存储器采用铁电串行接口存储芯片 FM24C04，通过 IIC 总线与 MCU 通讯，存储实时控制参数、控制命令和前期标定的牵引角度等参数。

#### 4.1.4 通讯接口

采用 Sipex 公司的增强型全双工 RS485 收发器 SP490E 和高速光耦 6N137 构成全双工高速 RS485 通讯接口，通讯波特率采用 3 8400 bps。

#### 4.1.5 角度传感器

角度传感器采用美国 EPC 公司三相方波输出光电增量式编码器 VLH11，选取分辨率为 3 600 P/R，具有角度变化方向指示，满足相应机械结构中的角度变化检测。为了确保角度脉冲采样准确不丢失，角度传感器的脉冲输出均接至微处理器的外部中断输入口 INT1~INT3<sup>[29]</sup>，使用边沿触发方式中断进行脉冲计数和方向判断。

接口电路是由钳位二极管、RC 滤波和整形电路组成，去除干扰毛刺，提高接口抗干扰能力。

#### 4.1.6 电磁阀驱动

电磁阀线圈供电驱动电路是由 N 通道硅 MOS 管 2SK2931 和光耦 TLP817 组成的管级联电路，如图 8 所示。D1 为高效二极管堆 10GL2CZ47A，可消除线圈反向续流，抑制浪涌。

#### 4.1.7 开关量输入输出电路

开关量输入输出电路由光耦 TLP817 和三极管 9013 构成，用于采集整机运行状态和位置，输出保护信号，例如料仓归位和传动锁死等。

#### 4.1.8 LCD 显示与状态指示

显示采用 128×64 图形点阵 LCD 显示屏，显示设置菜单、运行实时参数和报警异常等信息。蜂鸣

器和 LED 状态指示是以声音和光的形式向操作人员提示设备目前运行状态信息。

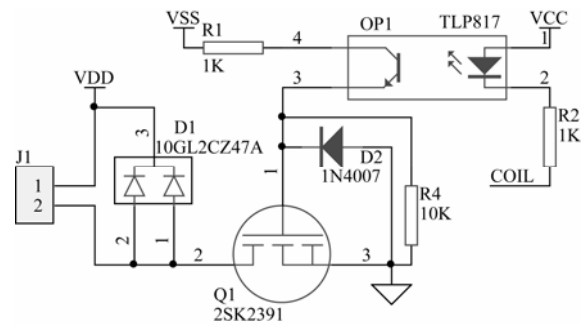


图 8 电磁阀驱动电路原理图  
Fig.8 Schematic diagram of solenoid valve drive circuit

### 4.2 软件设计

本系统中微处理器的软件均采用 Keil C 语言编写，系统控制功能主要由主控制器完成。图 9 为主控制器的软件流程图。

主控制器软件采用了固定双死区阈值控制方法，双死区阈值控制方法可以增加抗干扰能力、减少调节，从而提高稳定性<sup>[30]</sup>。本软件控制的固定死区阈值为  $\pm(d_2-d_1)/2$ ，由式 (2) 和式 (3) 可知，每次调整结束后甜菜根块均处于左右探测杆中心位置。如再次触发调整时偏移量必须超过固定死区阈值。

由流程图 9 可以看出，当甜菜根块引起的角度传感器偏差  $\Delta\beta \leq 2^\circ$  时，主控制器不立刻输出对行调整控制信号，只有角度偏差  $\Delta\beta_1 \geq 1^\circ$  持续 5 s 后进行微调，这样有利于消除角度传感器输出的脉冲信号抖动和控制动作频繁震荡。根据实验总结，在动作液压缸调整对行时，在控制的开始和结束时刻通过节流阀启动微调，有利于提高调整动作的平稳性和精确性。本设计根据现场实验，调整前节流阀接入时间常数为 500 ms 时，调整动作启动最为平稳，在

调整结束前，当牵引杆当前调整角度与目标角度的夹角  $\Delta\alpha \leq 2^\circ$  时，接入节流阀进行微调。

手持操控器的功能相对单一，主要有两方面功能：一是检测按键操作，并将操作转换为相应命令发送至主控制器；二是接受主控制器发送的控制参数和状态参数，并以 LCD 屏显示、蜂鸣器鸣叫和 LED 显示的形式体现。

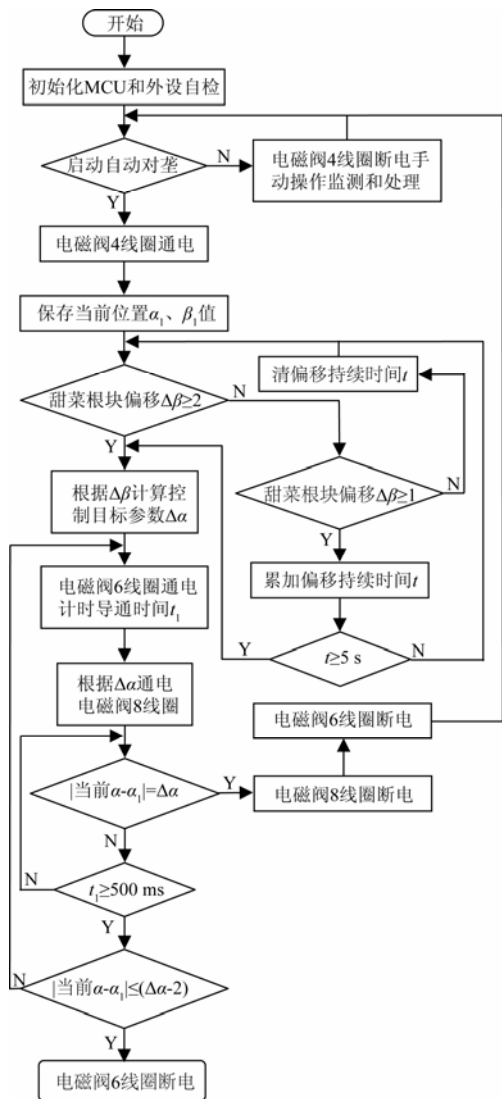


图 9 主控制器软件流程图  
Fig.9 Flowchart of main controller software

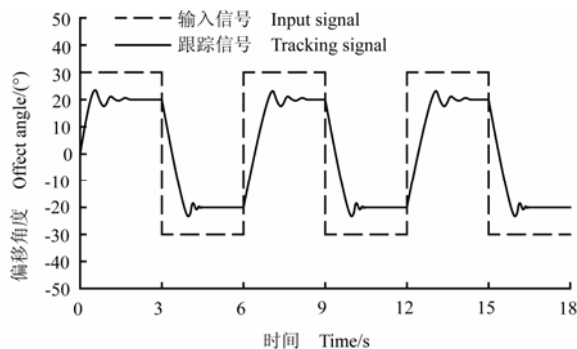
## 5 甜菜联合收获自动对行试验

### 5.1 自动对行系统动态响应试验

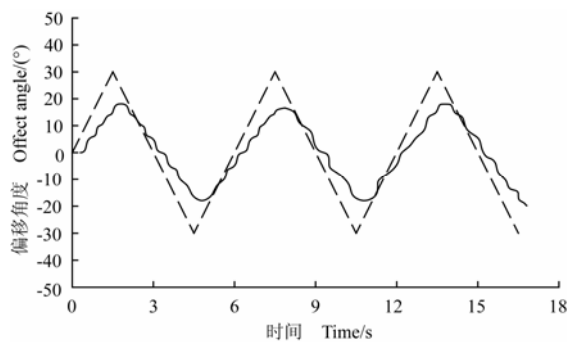
用福田雷沃重工 M1004-F 型拖拉机牵引甜菜联合收获机，提升牵引架使挖掘传输装置离地。软件模拟对行探测装置中的角度传感器信号输入，监测对行控制系统的动作。控制反馈信号来源于三角牵引架处的角度传感器，其输出信号实时反映对输入信号的动态跟踪，如图 10 所示。

根据实际甜菜垄上分布特性和收获情况，试验

分别模拟标准方波和三角波信号输入，监测反馈信号对输入信号的跟踪。信号周期为 6 s，角度幅值为  $30^\circ$ ，跟踪信号与输入信号的幅值比例是由式 (1) 中  $R$  和式 (3) 中  $R_1$  决定。试验结果分析显示，方波输入信号跟踪最大延时小于 0.5 s，超调量小于 15%；三角波输入信号跟踪最大误差为  $2.5^\circ$ ，平均误差为  $0.2^\circ$ ，最大延迟 0.3 s。



a. 方波信号跟踪  
a. Square wave signal tracking



b. 三角波信号跟踪  
b. Triangular wave signal tracking

注：输入标准信号周期为 6 s，角度幅值为  $30^\circ$ 。  
Note: Period of input wave signal is 6s and amplitude is  $30^\circ$ .

图 10 自动对行控制系统跟踪标准信号曲线

Fig.10 Track curves of auto-follow row system for standard signal

### 5.2 田间收获试验

2012 年 10 月在内蒙古自治区乌兰察布市察哈尔右翼前旗甜菜种植地进行试验。试验田垄距 610 mm，平均垄顶宽 350 mm，平均株距 355 mm。甜菜根块平均直径 110 mm，平均高度 195 mm，平均出土高度 42 mm，平均重量 1.2 kg。在每 2 m 长的样本范围内，甜菜根块偏离中心线距离平均 98 mm。土壤含水率 28.3%。

使用自动对行技术收获 6 垄，停止使用自动对行依靠拖拉机驾驶员人工对行收获 6 垄，交错进行，共收 12 垄进行对比试验，收获速度设定为 1.3~1.5 m/s。每收获一垄根据《甜菜收获机作业质量》<sup>[31]</sup>和《甜菜收获机械试验方法》<sup>[32]</sup>测定一次漏挖损失率、根体折断率和根块损伤率。试验结果如表 2 所示。

经试验统计,人工对行收获的6垄平均漏挖损失率为3.14%,平均根体折断率2.45%,平均根块损伤率4.31%,而采用自动对行收获的6垄平均漏挖损失率为1.01%,平均根体折断率0.97%,平均根块损伤率1.67%。通过对比可以看出采用自动对

行技术后,平均漏挖损失率降低了2.03%,平均根体折断率降低了1.48%,平均根块损伤率减低了2.64%,由此可以看出在甜菜收获过程中采用自动对行技术能够减少收获过程中的损失,从而提高种植户的经济效益。

表2 收获试验结果分析  
Table 2 Results analysis of harvesting test

垄数 Ridge number	漏挖损失率 Rate of unharvested/%		根体折断率 Rate of fractured/%		根块损伤率 Rate of damaged/%	
	人工对行 Manual-follow	自动对行 Auto-follow	人工对行 Manual-follow	自动对行 Auto-follow	人工对行 Manual-follow	自动对行 Auto-follow
	1	3.52	0.92	2.01	0.87	3.47
2	2.15	1.21	1.95	1.06	3.55	1.98
3	4.95	0.87	3.12	0.79	5.17	1.59
4	2.31	1.04	1.67	1.08	3.94	1.86
5	3.24	1.13	2.87	1.02	5.12	1.79
6	2.67	0.89	3.08	1.00	4.61	1.56
平均 Average	3.14	1.01	2.45	0.97	4.31	1.67

注:试验田的垄距610 mm,平均垄顶宽350 mm,平均株距355 mm。甜菜根块平均直径110 mm,平均高度195 mm,平均出土高度42 mm,平均重量1.2 kg。在每2 m长的样本范围内,甜菜根块偏离中心线距离平均98 mm。土壤含水率28.3%,收获速度设定为1.5 m/s。  
Note: In test field, the ridge distance is 610 mm, average width of ridge top is 350 mm, average plant spacing is 355 mm. The average diameter of beet root is 110 mm, average height is 195 mm, average height above soil is 42 mm, average weight is 1.2 kg. In each 2 m sample range, the average distance between the beet root and the row center is 98 mm. Soil moisture content is 28.3%. The speed of harvesting is set as 1.5 m/s.

## 6 结 论

1) 以牵引式甜菜联合收获机为载体,综合运用传感器技术、液压控制技术和单片机控制技术,结合双死区阈值控制方法,实现甜菜联合收获机收获过程中自动对行。对行自动调整最大延时小于0.5 s,超调量小于15%,平均误差为0.2°,提高了甜菜联合收获机的收获效率。

2) 甜菜联合收获机采用本自动对行控制系统后,漏挖损失率降低2.03%,根体折断率降低1.48%,根块损伤率降低2.64%,减少收获过程中的损失,提高种植户的经济效益。

### [参 考 文 献]

- [1] 王建楠,胡志超,彭宝良,等.国内外甜菜全程机械化生产现状与趋势[J].农业机械,2009(6):60-62.
- [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(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(1): 71-74. (in Chinese with English abstract)
- [3] 谭北雁,杨学军.我国甜菜机械化收获现状及分析[J].农业机械,2010(9):94-97.
- [4] 蔡国华,李慧,李洪文,等.基于ATmega128单片机的开沟深度自控系统试验台的设计[J].农业工程学报,2011,27(10):11-16.  
Cai Guohua, Li Hui, Li Hongwen, et al. Design of

- test-bed for automatic depth of furrow opening control system based on ATmega128 single chip microcomputer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(10): 11-16. (in Chinese with English abstract)
- [5] 赵涵俊.装在开沟器上的超声波探测器[J].粮油加工与食品机械,1989(1):43.  
Zhao Hanjun. An ultrasonic sensor attached to the opener[J]. Machinery for Cereals, Oil and Food Processing, 1989(1): 43. (in Chinese with English abstract)
- [6] Weatherly E T, Bowers Jr C G. Automatic depth control of a seed planter based on soil drying front sensing[J]. Transactions of ASAE, 1997, 40(2): 295-305.
- [7] Saeyes 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.
- [8] Saeyes W, Wallays C, Engelen K, et al. An automatic depth control system for shallow slurry injection, part 2: Control design and field validation[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(2): 161-170.
- [9] 张智刚,罗锡文,李俊玲.轮式农业机械自动转向控制系统研究[J].农业工程学报,2005,21(11):77-80.  
Zhang Zhigang, Luo Xiwen, Li Junling. Automatic steering control system of wheeled model farming machinery[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(11): 77-80. (in Chinese with English abstract)
- [10] 任文涛,迟德霞,刘金波,等.遥控插秧机自动转向系统设计及试验[J].农业机械学报,2012,43(1):175-179.

- Ren Wentao, Chi Dexia, Liu Jinbo, et al. Design and test on remote rice transplanter automatic steering system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 175—179. (in Chinese with English abstract)
- [11] 吴晓鹏, 赵祚喜. 东方红拖拉机自动转向控制系统设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 1—5.  
Wu Xiaopeng, Zhao Zuoxi. Development of auto steering control system on Dongfanghong tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [12] 陈军, 鸟巢谅. 拖拉机行驶路线的自动变更研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 83—86.  
Chen Jun, Ryo Torisu. Automatic control of lane change for autonomous tractors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(1): 83—86. (in Chinese with English abstract)
- [13] 陈文良, 谢斌, 宋正河, 等. 拖拉机电控液压力转向系统的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 122—125.  
Chen Wenliang, Xie Bin, Song Zhenghe, et al. Electro-hydraulic power steering system for tractors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(10): 122—125. (in Chinese with English abstract)
- [14] 吕安涛, 宋正河, 毛恩荣. 拖拉机自动转向最优控制方法的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 116—119.  
Lü Antao, Song Zhenghe, Mao Enrong. Optimized control method for tractor automatic steering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(8): 116—119. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张认成, 桑正中, 张际先. 联合收割机自动控制研究现状与展望[J]. 江苏理工大学学报, 1998, 19(2): 11—16.  
Zhang Rencheng, Sang Zhengzhong, Zhang Jixian. State of art and prospect on combine automatic control[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 1998, 19(2): 11—16. (in Chinese with English abstract)
- [16] 魏新华, 李耀明, 陈进, 等. 联合收割机工作过程智能监控装置的系统集成[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊 2): 56—60.  
Wei Xinhua, Li Yaoming, Chen Jin, et al. System integration of working process intelligent monitoring and controlling devices for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(Supp.2): 56—60. (in Chinese with English abstract)
- [17] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [18] 张立平, 李宪奎, 杨红普, 等. 逆平行四连杆机构的非正弦波及工艺参数[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 301—306.  
Zhang Liping, Li Xiankui, Yang Hongpu, et al. Non-sinusoidal wave and process parameters of anti-parallel four-bar linkage[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 301—306. (in Chinese with English abstract)
- [19] 万方艳, 张东兴. 糖用甜菜物理特性试验分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 2): 297—303.  
Wang Fangyan, Zhang Dongxing. Experimental analysis on physical characteristics of sugar beet[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(Supp.2): 297—303. (in English with Chinese abstract)
- [20] 高妙真, 张中男. 甜菜茎作栽培最佳群体结构的理论分析[J]. 中国甜菜糖业, 1996(1): 28—31.
- [21] 王华忠, 张文彬, 倪洪涛, 等. 不同土壤环境对甜菜质量的影响[J]. 中国糖料, 2003(4): 5—8.  
Wang Huazhong, Zhang Wenbin, Ni Hongtao, et al. Effect of different soil environment on yield and quality of sugar beet[J]. Sugar Crops of China, 2003(4): 5—8. (in Chinese with English abstract)
- [22] 胡寿松. 自动控制原理(第 4 版)[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [23] 张辉, 李树君, 张小超, 等. 变量施肥电液比例控制系统的设计与实现[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 2): 218—222.  
Zhang Hui, Li Shujun, Zhang Xiaochao, et al. Development and performance of electro-hydraulic proportion control system of variable rate fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(Supp.2): 218—222. (in Chinese with English abstract)
- [24] 崔长远, 朱瑞祥, 随顺涛, 等. 车载式变量施药机控制系统设计与实验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 105—109.  
Zhai Changyuan, Zhu Ruixiang, Sui Shuntao, et al. Design and experiment of control system of variable pesticide application machine hauled by tractor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(8): 105—109. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张利平. 液压控制系统及设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [26] 陈亚洲, 皮钧, 郑添义. 基于先导分配的电液比例控制平地机控制系统[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 7—12.  
Chen Yazhou, Pi Jun, Zheng Tianyi. Electro-hydraulic proportional manipulation system of land leveler based on pilot oil distribution method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(2): 7—12. (in Chinese with English abstract)
- [27] 余洋, 石博强, 侯友山. 结构刚度对液压伺服系统稳定性影响分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊 2): 32—35.  
Yu Yang, Shi Boqiang, Hou Youshan. Analysis on

- stability of hydraulic servo systems affected by structure stiffness[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(Supp.2): 32–35. (in Chinese with English abstract)
- [28] NEC Electronics Corporation. 78K0/KD2 8-Bit Single-Chip Microcontrollers User's Manual[EB/OL]. <http://www.cn.necel.com>, 2006-5/2012-03.
- [29] 朱定华, 戴颖颖. 单微机原理、汇编与 C51 及接口技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [30] 胡炼, 罗锡文, 赵祚喜, 等. 插秧机电控操作机构和控制算法设计[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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(4): 118–122. (in Chinese with English abstract)
- [31] NY/T1412-2007, 甜菜收获机作业质量[S].
- [32] JB/T6276-2007, 甜菜收获机械试验方法[S].

## Development of auto-follow row system employed in pull-type beet combine harvester

Wu Huichang, Hu Zhichao<sup>\*</sup>, Peng Baoliang, Gu Fengwei, Wang Haiou, Wang Bokai  
(Nanjing Research Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** The sugar beet is one of the major sugar crops in China, accounting for about 17% of Chinese total sugar production. As a seasonal operation, sugar beet harvesting in China is still mainly manual work, characterized by high labor intensity, low efficiency, great harvest losses, and huge occupation of farming, all of which constrain the further development of the sugar beet industry. Mechanized harvesting is the inevitable development trend of sugar beet harvesting. The current domestic sugar beet harvesters are basically simple sectional operating machinery. Sugar beet combine harvesters are mainly imported from abroad, having high automation and intelligence and advanced performance. The domestic beet combines are still in the prototype development stage, having a great gap with the advanced foreign technology. Auto-follow row technology is one of the key features of beet combine harvesting, having great influence on machinery performance. Although domestic researchers have performed lots of studies on the automatic control of agricultural machinery, research on control systems for auto-follow harvesters is still scarce, which greatly affects the automation level and operation performance of domestic beet combine harvesters. In order to improve the automation level and reduce harvesting loss, a set of auto-follow row system for a pull-type beet combine harvester was designed by adopting hydraulic technology, sensor signal acquisition technology, and microprocessor control technology, which was based on the ridge-planting cultivation of sugar beets. The system includes a row detection mechanism, an adjustment mechanism for traction offset, a hydraulic control system, an electronic control system, and control software. The row detection mechanism detects the position of the ridge top beetroot block, converts the offsets of excavation forward locus to angle quantity, and then sends the information to the offset angle acquisition sensor. The offset angle acquisition sensor converts angle information to a digital signal and sends it to the controller. The controller handles the angle signal and outputs a control signal for the solenoid valve, through the control software, opening the hydraulic cylinder drive oil line. The hydraulic cylinder drives the traction biasing mechanism, adjusting the digging position. The angle feedback sensor installed on the traction-offset mechanism feeds back the adjusted angle signal to the controller. The controller adjusts output control signals in real time, ensuring the excavation forward locus always consistent with the beetroot block position. The entire control system is a closed-loop feedback system. The controller is a single-chip microprocessor  $\mu$ PD78F0525. Control software adopts Keil C language, using a fixed double dead zone control algorithm, because it increases system noise immunity, avoids frequent shocks of control action, and improves control stability. Standard signal tracking tests showed that the system had fast-response characteristics and high stability. The results of comparison experiments showed that the harvesting indexes of the beet combine were improved by employing the control system of auto-follow row, in which the loss rate of un-harvested beets, the root body fracture rate, and the root block damage rate were reduced by 2.03%, 1.48% and 2.64%, respectively. This study can provide effective reference for the development of auto-follow row systems employed in similar harvesting machinery.

**Key words:** agricultural machinery, automation, sensors, beet combine harvester, auto-follow row