

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.012

# 牵引式甜菜联合收获机自动对行系统设计与台架试验

王申莹<sup>1,2</sup> 胡志超<sup>1,2</sup> CHEN Charles<sup>3</sup> 高学梅<sup>1,2</sup> 顾峰玮<sup>1,2</sup> 吴惠昌<sup>1,2</sup>

(1. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 农业农村部现代农业装备重点实验室, 南京 210014;  
3. 奥本大学农学院, 奥本 AL 36849)

**摘要:** 为提升中国甜菜收获机械的自动化水平和作业性能, 依托前期研制的 4LT-A 型牵引式甜菜联合收获机和 4LTSYT-A 型甜菜自动对行收获田间模拟试验台, 对自动对行系统进行了总体结构和关键部件设计及参数确定。以漏挖率、破损率和反应时间为自动对行性能指标, 以复位弹簧预紧力、前进速度、偏离距离、液压流量、供油压力及株距为试验因素进行了单因素台架试验, 分析了各因素对各性能指标的影响显著性和影响规律。方差分析和直观分析结果表明, 弹簧预紧力、前进速度、偏离距离和液压流量均对各性能指标影响显著, 供油压力和株距对各性能指标影响不显著。随弹簧预紧力的增大(53~346 N), 反应时间增加, 漏挖率和破损率先减小后增大, 当预紧力为 198 N 时, 漏挖率和破损率最低, 分别为 2.34%、3.77%; 随前进速度的增加(0.4~2.0 m/s), 漏挖率和破损率逐渐增大, 反应时间逐渐减小并趋于稳定; 液压流量在 15~35 L/min 变化时, 漏挖率逐渐减小, 反应时间和破损率先减小后增加, 当液压流量  $q=25$  L/min 时, 破损率和反应时间最小, 分别为 3.77%、0.47 s; 各性能指标随偏离距离的增加而逐渐增加, 自动对行系统在偏离距离 0~60 mm 范围内的适应性较好。

**关键词:** 甜菜; 联合收获机; 牵引式; 自动对行; 性能试验; 台架试验

中图分类号: S225.7<sup>+</sup>2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)04-0103-10

OSID:



## Bench Test and Analysis on Performance of Autofollow Row for Traction Sugar Beet Combine Harvester

WANG Shenying<sup>1,2</sup> HU Zhichao<sup>1,2</sup> CHEN Charles<sup>3</sup> GAO Xuemei<sup>1,2</sup> GU Fengwei<sup>1,2</sup> WU Huichang<sup>1,2</sup>

(1. Nanjing Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China  
2. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China  
3. College of Agriculture, Auburn University, Auburn AL 36849, USA)

**Abstract:** Aiming to improve the automation level and operation performance of sugar beet harvesting machinery in China, reduce the loss of damage and leakage digging, and reduce the labor intensity of personnel, 4LT-A type traction sugar beet combine harvester and 4LTSYT-A autofollow row field simulation experiment platform were developed, and the kinematics analysis of autofollow row system was also carried out. During the tests, the 4LTSYT-A autofollow row field simulation experiment platform was placed under the beet root deviation distance detection mechanism and digging mechanism of the 4LT-A type beet combine harvester, and its power was provided by the variable frequency motor controlled by the control box. The 4LT-A type beet combine harvester was towed and powered by a John Deere 1054 tractor. Single factor bench tests were carried out by taking leakage digging rate, damage rate and response time as the autofollow row performance indexes, and taking reset spring preload force, forward speed, deviation distance, hydraulic flow and oil supply pressure and plant spacing as test factors. The significance and influence of each factor on each performance index were analyzed. The variance analysis and visual analysis of the single factor test results showed that the spring preload force, forward speed, deviation distance and hydraulic flow had significant effects on each performance index, the oil supply pressure and plant spacing had no significant effect on each performance index. With the increase of spring preloading force (range of 53~346 N), the response time was increased, and the leakage digging rate and damage rate was firstly decreased and then increased. When the preloading force

收稿日期: 2019-11-01 修回日期: 2020-01-21

基金项目: 中国农业科学院农科英才项目、中国农业科学院科技创新工程项目和国家重点研发计划项目(2016YFD0701604)

作者简介: 王申莹(1986—),男,助理研究员,主要从事农业机械装备机电液一体化和虚拟仿真技术研究, E-mail: 465499517@qq.com

通信作者: 胡志超(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事土下果实生产机械化技术与装备研究, E-mail: nfzhongzi@163.com

was 198 N, the leakage digging rate and damage rate were the lowest, which were respectively 2.34% and 3.77%. With the increase of forward speed, the leakage digging rate and damage rate were increased gradually, and the response time was decreased gradually and tended to be constant. When the hydraulic flow was changed from 15 L/min to 35 L/min, the leakage digging rate was gradually decreased, and the response time and damage rate were first decreased and then increased. When the hydraulic flow  $q = 25$  L/min, the damage rate and response time were the smallest, which were 3.77% and 0.47 s, respectively. Each performance index was increased gradually with the increase of deviation distance, and the autofollow row system had a good adaptability to the deviation distance of 0 ~ 6 cm. This research can provide reference for the later parameter optimization and the research of automatic row harvesting system of beet and other undersoil fruit harvesters.

**Key words:** beet; combine harvester; traction type; autofollow row; performance test; bench test

## 0 引言

为提高甜菜产量,甜菜主产区多采用垄作移栽方式种植。我国甜菜种植机械化水平较低,种植多以半机械化为,导致出现种植行距不等、收获期甜菜直线性差、块根偏离行中心线等问题<sup>[1]</sup>。挖掘收获时如挖掘铲前进方向出现偏差,则造成漏挖、少挖或破损,需要人工再次挖掘,损失大、效率低。自动对行挖掘收获是解决上述问题的主要技术之一。

国外对甜菜机械化收获技术研究较早,但多集中在切顶机构及切顶质量影响因素、机械液压式自动转向和自动限深等方面<sup>[2-12]</sup>。国内张国凤等<sup>[13]</sup>设计了切割厚度可调的甜菜切顶机构,并通过ADAMS虚拟样机进行了试验验证。李阳<sup>[14]</sup>设计分析了甜菜仿形切削装置。王方艳等<sup>[1,15]</sup>研究了挖掘深度和挖掘距离对甜菜起拔力的影响,设计了一种机械式液压对行导向装置,并分析了导向机构的受力及运动特性。李建东等<sup>[16]</sup>设计了一种用于甜菜联合收获机的自动随行导向组合式挖掘装置。苟爱梅<sup>[17]</sup>设计了一种由带轮传输、“V”形带和倒“L”形挡板构成的定向装置及利用固定圆盘式切刀为主要结构的小型甜菜切顶装置。本团队近年来提出主动式自动对行挖掘收获方式,并研发出牵引式甜菜联合收获机科研样机,对切顶装置、输送装置以及自动对行系统进行了初步研究<sup>[18-22]</sup>。但影响自动对行性能的各因素及其影响趋势尚不清晰,作业质量提升途径尚不明确。

为此,本文设计4LT-A型甜菜联合收获机和4LTSYT-A型甜菜机械化收获自动对行田间模拟试验台,以漏挖率、破损率和反应时间为自动对行性能指标,研究影响各性能指标的主要因素及影响规律,以期提高自动对行收获灵敏性和作业性能。

## 1 结构与工作原理

4LT-A型甜菜联合收获机自动对行装置主要

由机架、牵引架、液压纠偏执行机构、甜菜块根偏离行中心线距离检测机构以及挖掘机构等组成<sup>[22]</sup>,如图1a所示。主要参数如表1所示。

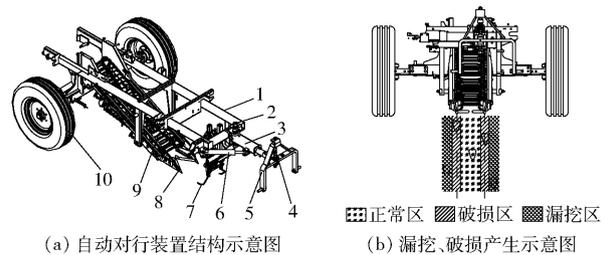


图1 甜菜自动对行联合收获机结构与原理图

Fig. 1 Schematics of beet autofollow row combine harvester structure and principle

1. 主机架 2. 后角度传感器 3. 牵引杆 4. 前角度传感器 5. 牵引架 6. 液压缸 7. 偏离距离检测机构 8. 挖掘机构 9. 输送带 10. 行走轮

表1 联合收获机主要参数

Tab. 1 Major performance parameters of combine harvester

参数	数值
配套动力/kW	> 50
适应行距/mm	500 ~ 700
作业幅宽/mm	1 000 ~ 1 400
工作行数	2(1行打叶,1行挖掘)
挖掘深度/mm	0 ~ 180
作业速度/(m·s <sup>-1</sup> )	0.5 ~ 1.8
生产率/(hm <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	0.12 ~ 0.36

联合收获机作业时,田间甜菜块根与挖掘机构的相对位置主要有3种情况,如图1b所示,当甜菜块根位于正常区时,会被完好无损地挖起;位于破损区时,则导致少挖或挖破;位于漏挖区时,则会因超出挖掘机构的挖掘范围而产生漏挖现象。

收获作业前,手动调整挖掘机构的位置,使其对准垄顶两侧;带有自动对行系统的甜菜联合收获机作业时,由偏离距离检测机构感知甜菜块根偏离行中心线的距离并将信息发送给控制器;控制器分析计算后输出电磁阀控制信号驱动液压缸带动牵引杆

偏移,调整主机架的左右前进方向,进而带动挖掘机构左右偏转,使挖掘机构对准甜菜块根收获;同时,前后角度传感器和实时监测自动对行机构是否纠偏到位,以确保挖掘收获前进路线始终与田间垄上甜菜块根分布一致,使甜菜块根始终位于正常区,实现自动对行挖掘收获,以减少漏挖和破损。

## 2 关键部件设计与参数确定

### 2.1 偏离距离检测机构

作为自动对行系统关键部件的偏离距离检测机构,主要由四连杆机构、角度传感器、信号转换机构、复位弹簧和左右探测杆等组成,如图2所示。固定架与收获机连接,挂杆上安装有左右探测杆,固定架、挂杆与连杆构成平行四连杆机构,弹簧限位板与复位弹簧实现探测杆发生偏移后产生复位力,角度传感器通过传感器安装板与固定架固定,角度传感器空心轴通过传感器支板和传感器连接轴与挂杆固定。

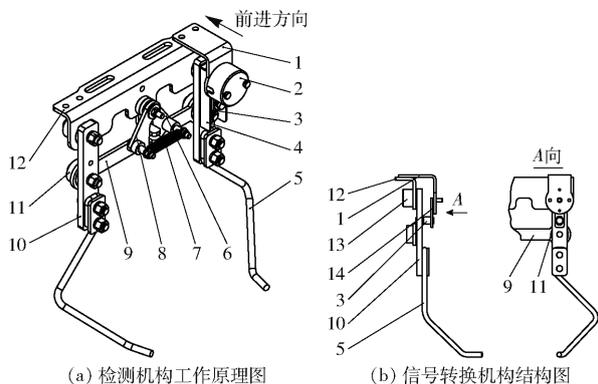


图2 偏离距离检测机构结构与原理图

Fig.2 Deviation distance detection mechanism

1. 传感器安装板 2. 角度传感器 3. 传感器连接轴 4. 传感器支板 5. 右探测杆 6. 右弹簧限位板 7. 复位弹簧 8. 左弹簧限位板 9. 连杆 10. 挂杆 11. 轴承 12. 固定架 13. 固定架轴承 14. 摆杆

收获作业时,左右探测杆感知垄上甜菜块根的左右偏移,通过四连杆机构带动挂杆、传感器支板和传感器连接轴旋转,信号转换机构将探测杆的左右位移转换为角度变化量传输给角度传感器,角度传感器将角度变化量转换成数字脉冲信号传输给控制器。

其中信号转换机构是检测机构的核心部分,主要是将甜菜块根偏离行中心的左右位移转换成角度传感器能识别的角度信号。其结构如图2b所示,主要由传感器安装板、摆杆、传感器连接轴、挂杆和连杆组成。传感器外壳与传感器安装板固定连接,挂杆的横轴穿过传感器安装板的圆孔与传感器的转动轴固定连接,挂杆的竖板上开有长形孔(长形孔有

助于摆杆横轴与传感器轴对心),传感器连接轴穿过长形孔(连接轴外表面与长形孔内表面相切)并与挂杆固定连接,探测杆与挂杆固定连接。

为保证偏离的块根都能顺利通过检测装置,且减少探测杆与偏离距离较小的块根的频繁碰撞,探测杆设计成后倾八字形,且入口、出口宽度(如图2所示)满足

$$w_1 \geq d \tag{1}$$

$$w_2 \geq 2(H + d/2) \tag{2}$$

式中  $w_1$ ——后倾倒八字形探测杆出口处宽度,mm

$w_2$ ——后倾倒八字形探测杆入口处宽度,mm

$H$ ——甜菜块根偏离行中心距离,mm

$d$ ——甜菜块根直径,mm

经对甜菜主产区实地测量, $H$ 为0~90 mm, $d$ 为50~140 mm。甜菜块根直径分布如图3所示。代入式(1)、(2)并考虑结构尺寸,设计得  $w_2 = 400$  mm,  $w_1 = 250$  mm。

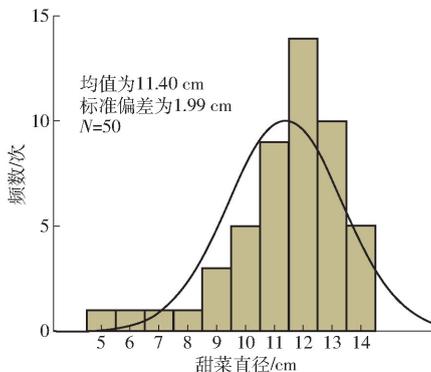


图3 甜菜块根直径分布

Fig.3 Diameter distribution of beet root

偏离距离检测机构运动示意图如图4所示,作业时,偏离距离检测机构左右探测杆分别位于甜菜块根的两侧,当与偏离的甜菜块根接触碰撞产生偏离距离 $\pm H$ 时,四连杆机构将位移变化量 $\pm H$ 转换为角度传感器的角度变化量 $\pm \Delta\alpha$ (设逆时针为正)。

由上述分析和图4可知,当甜菜块根偏移量  $H < (w_1 - d)/2$  时,偏离距离检测机构不响应甜菜块根的偏移量,这有利于消除偏离距离检测机构因甜菜块根的微小偏移而产生频繁摆动;当甜菜块根偏移量  $H \geq (w_1 - d)/2$  时,探测杆与偏离的甜菜块根接触碰撞并产生偏离位移,同时带动角度传感器旋转轴产生旋转角度,控制器根据角度传感器输出的 $\alpha$ ,计算出甜菜块根的偏移量(将探测杆摆动的弧线长度近似为直线长度)

$$H = l + w_1/2 - d/2 \tag{3}$$

$$\text{其中 } l = \pi\alpha R/180 \tag{4}$$

式中  $l$ ——探测杆产生的偏离位移,mm

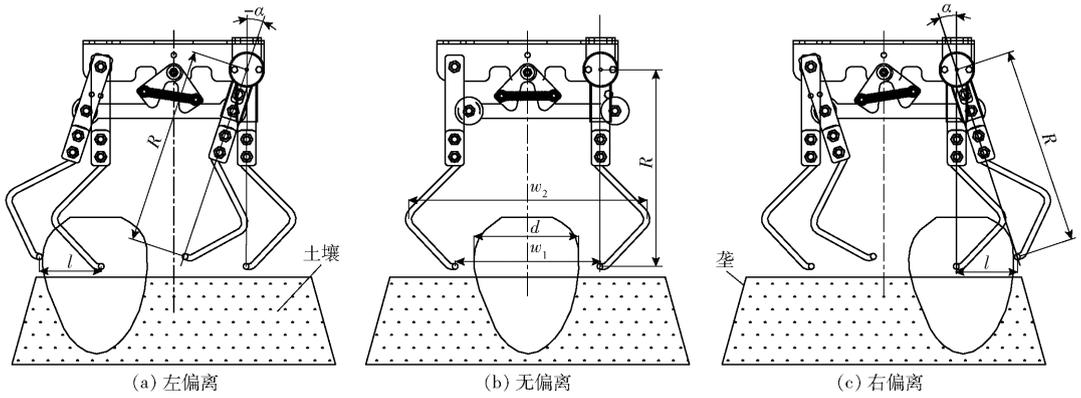


图4 检测机构运动示意图

Fig. 4 Schematics of detection mechanism movement

$\alpha$ ——角度传感器的转动角, ( $^\circ$ )

$R$ ——探测杆摆动半径, mm

$w_1 = 250$  mm, 设计时取  $R = 350$  mm, 甜菜块根直径取平均值  $d = 120$  mm, 代入式(3)、(4)可得甜菜块根偏移量计算公式为

$$H = 6.11\alpha + 65 \quad (5)$$

## 2.2 液压纠偏执行机构

液压纠偏执行机构主要接收控制器发出的控制信号,通过液压油缸带动挖掘机构左右移动进行对正挖掘,同时将纠偏转向机构的转向角度实时反馈给控制器,防止调整过量。其结构如图5所示,主要由后传感器安装板、摆杆、后传感器连接轴、牵引杆和液压油缸等组成。牵引杆一端与拖拉机铰接,一端与车架铰接;油缸一端与牵引杆铰接,一端与车架铰接,构成三角形转换机构。后传感器安装板与车架固定连接,旋转轴套安装在后传感器安装板上,后传感器连接轴焊接在牵引杆上。后传感器外壳与旋转轴套固定连接,摆杆的竖轴穿过旋转轴套与传感器的转动轴固定连接,摆杆的横板上开有长形孔,后传

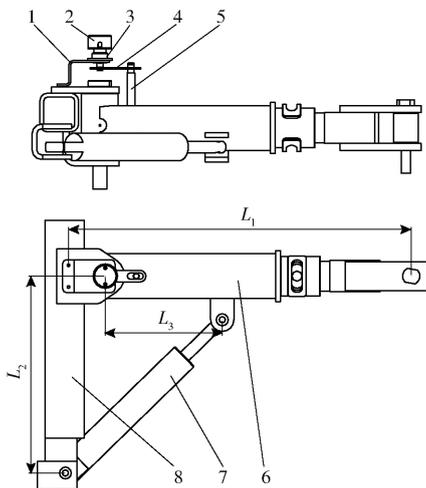


图5 液压纠偏执行机构结构简图

Fig. 5 Schematic of hydraulic deviation correction actuator

1. 后传感器安装板 2. 后角度传感器 3. 旋转轴套 4. 摆杆
5. 后传感器连接轴 6. 牵引杆 7. 油缸 8. 车架

感器连接轴穿过长形孔(连接轴外表面与长形孔内表面相切;前角度传感器与后角度传感器形式和安装结构相同,图5中省略)。

根据联合收获机整机空间结构(长度、宽度等),借鉴日本常用的牵引式甜菜联合收获机并结合液压油缸常用规格尺寸,设计检测机构到前角度传感器在前进方向上的长度  $L_1 = 1160$  mm,车架与牵引杆和液压油缸两铰接点之间的距离  $L_2 = 510$  mm,牵引杆与液压油缸和机架两铰接点之间的距离  $L_3 = 410$  mm。

液压油缸作为液压纠偏执行机构的主要部件,参照文献[21]和 GB/T 2348—1993 液压油缸缸内径和活塞杆直径系列,设计活塞杆直径  $d_1 = 32$  mm,油缸内径  $d_2 = 63$  mm,油缸外径  $D = 71$  mm,行程  $S = 250$  mm。

作业时,当偏离距离检测机构检测到甜菜块根的偏移,控制器根据式(5)计算出块根偏移量  $H$  时,为实现自动对行挖掘,控制器应输出控制信号使液压油缸伸缩一定距离  $\Delta L_y$ ,带动挖掘铲向相同方向偏移相同的距离。如图6所示,理想条件下拖拉机牵引甜菜联合收获机沿直线行走,牵引杆与前进方向的夹角为  $\beta$ ,且  $\beta = \theta$ 。控制器根据前角度传感器(图1)偏移角  $\beta$  的变化量  $\Delta\beta$  计算挖掘机构的偏移量。甜菜根块偏移量  $H$  和液压油缸伸缩量  $\Delta L_y$  与  $\Delta\beta$ 、 $\Delta\theta$  的对应关系近似为

$$\Delta\beta = \frac{180H}{\pi(L_1 + L_4)} \quad (6)$$

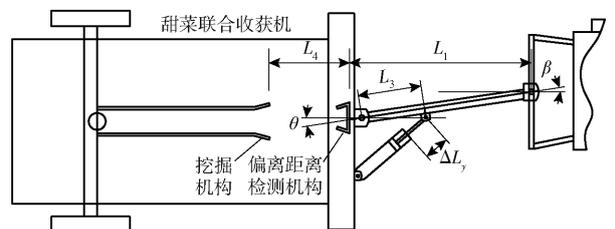


图6 液压纠偏执行机构运动示意图

Fig. 6 Schematic of hydraulic deviation correction actuator

$$\Delta\theta = \frac{180\Delta L_y}{\pi L_3} \quad (7)$$

式中  $\Delta\theta$ ——后角度传感器角度变化量, (°)

$L_4$ ——挖掘机构到检测机构的距离, mm

理想条件下  $\Delta\beta = \Delta\theta$ , 将设计值  $L_1 = 1\ 160\text{ mm}$ 、 $L_2 = 600\text{ mm}$ 、 $L_3 = 410\text{ mm}$  代入式(6)和式(7), 简化得

$$\Delta\beta = 0.033H \quad (8)$$

$$\Delta L_y = L_3 H / (L_1 + L_2) = 0.233H \quad (9)$$

### 3 试验

#### 3.1 试验材料

选取甜菜主产区之一的内蒙古自治区乌兰察布市察哈尔右翼前旗的甜菜作为试验材料, 品种为吉甜系列。随机选取的甜菜块根直径为 80 ~ 120 mm, 长度为 150 ~ 200 mm, 单颗质量为 0.5 ~ 1.5 kg。

#### 3.2 评价指标

由上述分析可知, 与甜菜联合收获机自动对行相关的收获质量性能指标主要有漏挖率、破损率及自动对行系统灵敏性(具体为系统反应时间), 参考 NY/T 1412—2007《甜菜收获机作业质量》, 定义试验评价指标为

$$\eta_l = \frac{M_{lz}}{M} \times 100\% \quad (10)$$

$$\eta_p = \frac{M_{pz}}{M} \times 100\% \quad (11)$$

$$T = T_1 + T_2 + T_3 \quad (12)$$

式中  $\eta_l$ ——漏挖率, %

$\eta_p$ ——破损率, %

$M_{lz}$ ——漏挖的块根质量, kg

$M_{pz}$ ——破损的块根质量, kg

$M$ ——试验块根总质量, kg

$T$ ——自动对行系统反应时间, s

$T_1$ ——偏离距离检测系统信号提取时间, s

$T_2$ ——信号处理控制系统处理时间, s

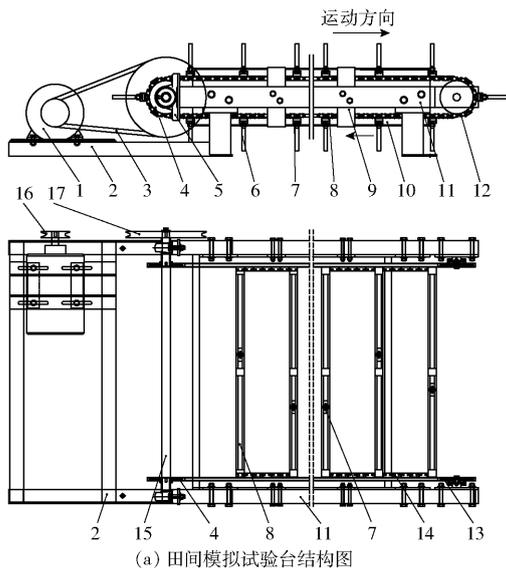
$T_3$ ——液压纠偏执行系统动作时间, s

#### 3.3 试验设备和仪器

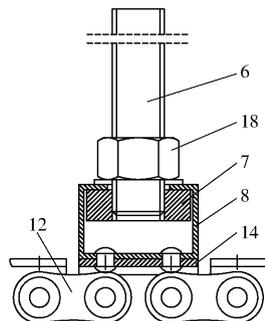
在对甜菜收获机进行田间试验时, 需要较好的气象环境, 且在试验过程中需调整挖掘机构与甜菜垄的对中性, 以避免产生太大偏差。由于甜菜收获机体积庞大, 操作繁琐, 田间试验时大多时间消耗在移动、调整收获机上, 而非试验或数据采集上。由此产生了田间试验成本高、费时费力且易受天气环境影响等问题, 长期以来一直影响着甜菜收获机的田间试验效率和试验数据的获取。

为解决上述问题, 本文设计了 4LTSYT - A 型甜

菜机械化收获自动对行田间模拟试验台, 如图 7 所示。该试验台可模拟田间甜菜不同株距、不同偏离行中心线距离等种植农艺参数及收获机不同的前进速度, 主要由机架、株距调节装置、偏离行中心距调节装置、运行速度调节装置、传动装置、张紧装置以及传动链的防下垂装置等组成。主要参数如表 2 所示。



(a) 田间模拟试验台结构图



(b) 甜菜块根固定装置示意图

图 7 4LTSYT - A 型甜菜机械化收获自动对行试验台

Fig. 7 Model 4LTSYT - A beet harvest mechanization autofollow row bench

1. 变频电机 2. 电机安装架 3. 传动带 4. 主动链轮 5. 带座轴承 6. 甜菜安装杆 7. 滑块 8. 滑槽 9. 托链盒安装板 10. 托链盒 11. 机架 12. 传动链 13. 从动链轮 14. 传动链附板 15. 主动链轮安装轴 16. 主动带轮 17. 从动带轮 18. 螺母

表 2 4LTSYT - A 型试验台主要技术参数

Tab. 2 Main technical parameters of type 4LTSYT - A bench

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	4 600×780×240
配套电机功率(转速)/kW(r·min <sup>-1</sup> )	0.55(1 430)
变频器功率/kW	0.75
偏离行中心距离/mm	0~350
株距/mm	25~800
前进速度/(m·s <sup>-1</sup> )	0~2.08

偏离行中心距离的调节:可通过调节螺母的松紧使甜菜安装杆连同滑块在滑槽上左右滑动,来模拟田间块根偏离行中心线的距离。株距的调节:可通过改变两滑槽之间间隔的传动链附板的个数或改变两块根固定装置之间间隔的滑槽个数来模拟田间不同的株距。前进速度的调节:可通过调节变频电机的转速来改变从动带轮的转速,进而改变传动链的运动速度。

其他主要试验设备:4LT-A型甜菜联合收获机和约翰迪尔1054型拖拉机。主要器材有:TGT-100型台秤(量程100 kg,精度0.02 kg)、卷尺(量程5 m,精度1 mm)、福禄克931型转速计(量程1~19 999 r/min,精度 $\pm 0.02\%$ )、FastecHiSpec 5型高速摄影仪(CMOS探测器,290万像素,8 bit黑白或RGB彩色;感光度:1000ISO彩色;光谱带宽:400~900 nm;拍摄速度:最高分辨率下可达523 f/s,降低分辨率情况下,可达272 135 f/s)、福禄克190~102型示波器(2通道,带宽100 MHz,垂直分辨率8 bit,最大实时采样速率1.25 GS/s,每通道27 500点的记录长度)、BM902型万用表。

### 3.4 试验方法

将4LTSYT-A型甜菜机械化收获自动对行田间模拟试验台置于4LT-A型甜菜联合收获机挖掘机构和偏离距离检测机构的下方,动力由变频电机提供;4LT-A型甜菜联合收获机由约翰迪尔1054型拖拉机牵引挂接并提供动力,如图8所示。



图8 收获机和试验台位置关系图

Fig.8 Diagram of harvester and test bench position

为避免挖掘机构与试验台上块根安装杆刚性接触碰撞,设计了弹性挖掘机构代替原刚性挖掘机构,如图9所示,其主要由内外八字形弹性杆、锁紧螺栓、套筒和安装螺栓组成。套筒通过安装螺栓固定在挖掘机构安装架上,弹性杆装入套筒中并通过锁紧螺栓固定。试验时,当甜菜块根与弹性杆内八字部分接触时,代表此块根破损;当与外八字部分接触时,代表此块根漏挖;与弹性杆内、外八字部分均未接触代表此块根正常挖起。试验过程采用高速摄影仪进行监测,以计算漏挖率和破损率。

为测量自动对行系统反应时间,将偏离距离检测系统的传感器和液压纠偏执行机构处的反馈传感

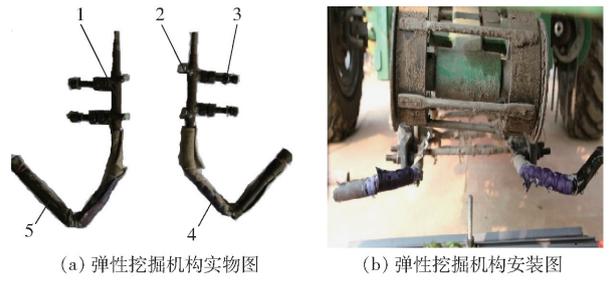


图9 弹性挖掘机构

Fig.9 Flexible digging mechanism

1. 套筒
2. 锁紧螺栓
3. 安装螺栓
4. 弹性杆内八字部分
5. 弹性杆外八字部分

器分别接入到示波器的蓝、红两通道,如图10所示。通过分析两传感器的波形,测量出自动对行系统的反应时间。



图10 系统反应时间测量

Fig.10 System response time measurement

### 3.5 因素水平选取

根据对牵引式甜菜联合收获机自动对行系统工作原理和前期虚拟试验研究结果<sup>[22]</sup>,弹簧预紧力 $F_y$ 、供油压力 $p_s$ 、液压流量 $q$ 、作业前进速度 $v$ 、株距 $L$ 和偏离距离 $H$ 对自动对行作业有较大影响,是影响漏挖率、破损率和反应时间等性能指标的重要参数。因此试验选择上述6个因素进行试验,进一步分析各因素对各性能指标的影响。

弹簧预紧力:选用同一种刚度的弹簧丝制作长度不同的弹簧,并在WDW-10型力学电子万能试验机上测量各弹簧拉伸到安装长度时的实际拉力。液压流量和供油压力:通过调节4LT-A型甜菜联合收获机液压系统的流量调节阀和溢流阀来改变液压流量和供油压力。其余参数设置见田间模拟试验台相关内容。

根据作者前期的设计分析和虚拟仿真试验结果<sup>[22]</sup>及对中国甜菜主产区实地调研数据的统计分析结果,设置各因素水平如表3所示。

### 3.6 试验结果与分析

#### 3.6.1 弹簧预紧力的影响

为研究弹簧预紧力对各性能指标的影响规律,试验方案采取单因素试验,根据前期虚拟试验中自动对行效果较好的各因素水平,取供油压力 $p_s =$

表3 试验因素水平  
Tab.3 Levels of test factors

水平	因素					株距 $L/\text{mm}$
	弹簧预紧力	前进速度 $v/$	液压流量 $q/$	供油压力 $p_s/\text{MPa}$	偏离距离 $H/\text{mm}$	
	$F_y/\text{N}$	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$			
1	53	0.4	15	15	30	200
2	125	0.8	20	18	60	300
3	198	1.2	25	21	90	400
4	272	1.6	30	24	120	
5	346	2.0	35	27	150	

18 MPa, 液压流量  $q = 25 \text{ L/min}$ , 作业前进速度  $v = 1.2 \text{ m/s}$ , 偏离距离  $H = 60 \text{ mm}$ , 株距  $L = 300 \text{ mm}$ 。每个因素水平重复试验3次, 结果如表4所示, 对重复试验取均值, 结果如图11所示。

表4 弹簧预紧力对各指标的影响

Tab.4 Influence of spring preload on indexes

弹簧预紧力 $F_y/\text{N}$	反应时间 $T/\text{s}$	漏挖率 $\eta_l/\%$	破损率 $\eta_p/\%$
53	0.454	2.34	3.87
53	0.455	2.35	3.86
53	0.457	2.38	3.88
125	0.456	2.35	3.87
125	0.457	2.34	3.82
125	0.456	2.36	3.85
198	0.467	2.34	3.76
198	0.466	2.35	3.78
198	0.468	2.34	3.78
272	0.477	2.37	3.86
272	0.477	2.38	3.83
272	0.479	2.36	3.81
346	0.483	2.37	3.85
346	0.485	2.37	3.84
346	0.483	2.38	3.95

表5 弹簧预紧力对各指标影响的方差分析

Tab.5 Variance analysis of spring preload on indexes

方差来源	平方和	自由度	均方	$F$	$P$
$T$	组间	0.002	4	0	376.842 < 0.000 1
	组内	0	10	0	
	总和	0.002	14		
$\eta_l$	组间	0.002	4	0	3.524 0.048
	组内	0.001	10	0	
	总和	0.003	14		
$\eta_p$	组间	0.021	4	0.005	5.071 0.017
	组内	0.010	10	0.001	
	总和	0.031	14		

从图11可以看出, 弹簧预紧力在53~346 N变化时, 自动对行系统反应时间增加。这是因为随着复位弹簧预紧力的增加, 两探测杆之间的拉力增大, 探测杆的摆动阻力增大, 摆动困难, 摆动速度变慢, 增加了偏离距离检测系统的信号提取时间, 进而增加了反应时间。

预紧力在53~346 N变化时, 漏挖率和破损率呈先减小后增大的趋势。这主要是由于泥土灰尘的存在, 偏离距离检测机构的转动部分自身存在一定的摩擦力; 当探测杆摆动后, 需要一定的拉力克服摩擦力使探测杆复位, 且拉力越大复位越快; 同时为防止收获过程中由于机器的振动而导致探测杆抖动, 及在平衡位置时防止探测杆稍受到力(如杂草、甜菜茎叶、松软土块等的扰动)就往复摆动, 复位弹簧需要一定的预紧力; 当预紧力从小于上述两个力中的最佳值逐渐增大并超过最佳值时, 漏挖率和破损率会先减小后增大; 且当预紧力增加到  $F_y = 198 \text{ N}$  时, 漏挖率和破损率减小到最低, 分别为2.34%、3.77%, 随后增加。

### 3.6.2 前进速度的影响

对前进速度进行单因素试验, 弹簧预紧力固定为上述单因素试验中漏挖率和破损率最小时的较佳值  $F_y = 198 \text{ N}$ , 其他同3.6.1节。每组试验重复试验3次, 取均值, 试验结果如图12所示。

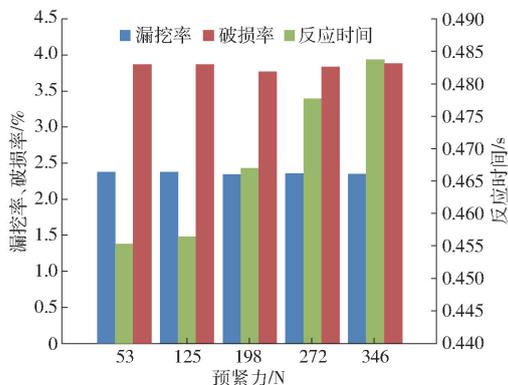


图11 弹簧预紧力对各指标的影响

Fig.11 Influence of spring preload on indexes

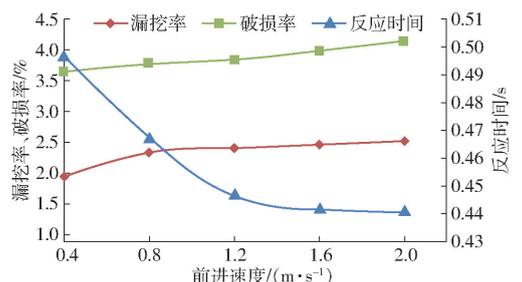


图12 前进速度对各指标的影响

Fig.12 Influence of forward speed on indexes

用SPSS 19.0软件在显著性水平  $\alpha = 0.05$  下对弹簧预紧力进行  $P$  检验, 方差分析如表5所示, 结果表明, 弹簧预紧力对反应时间的影响极显著, 对漏挖率和破损率的影响显著。

由图12可知, 随前进速度的增加, 反应时间逐渐减小并趋于稳定, 漏挖率和破损率呈逐渐增

大趋势,且在速度超过 1.2 m/s 时破损率增大加快。

给定显著性水平  $\alpha=0.05$ , 方差分析结果如表 6 所示, 结果表明反应时间、破损率和漏挖率均满足  $P<0.01$ , 因此前进速度对反应时间、漏挖率和破损率的影响均极显著。

表 6 前进速度对各指标影响的方差分析

Tab. 6 Variance analysis of forward speed on indexes

方差来源	平方和	自由度	均方	$F$	$P$	
$T$	组间	0.007	4	0.002	951.722	<0.000 1
	组内	0	10	0		
	总和	0.007	14			
$\eta_i$	组间	0.605	4	0.151	1 030.795	<0.000 1
	组内	0.001	10	0		
	总和	0.606	14			
$\eta_p$	组间	0.448	4	0.112	989.029	<0.000 1
	组内	0.001	10	0		
	总和	0.449	14			

随着前进速度的增加, 探测杆与甜菜块根的碰撞接触时间减小, 从而减少了偏离距离检测系统的信号提取时间; 但当速度大到一定程度后, 系统各环节的反应时间将达到“饱和”状态; 所以随着前进速度的增加, 反应时间逐渐减小并趋于稳定。但前进速度的增加和反应时间的减小, 使挖掘机构在反应时间内还没有调整到位就已开始挖掘, 所以导致漏挖率和破损率的增加。从图 12 中还可以看出, 当  $v<0.8$  m/s 时, 挖掘机构能及时调整到位, 漏挖率较低; 而当速度增加到  $v=1.6$  m/s 后, 挖掘机构在反应时间内调整到与目标位置的差距增大, 但尚可挖到, 所以破损率快速增加, 而漏挖率增加缓慢。结合生产效率考虑, 取前进速度  $v=1.2$  m/s。

### 3.6.3 液压流量的影响

固定前进速度  $v=1.2$  m/s, 其他因素值同 3.6.2 节, 对液压流量进行单因素试验, 结果如图 13 所示。

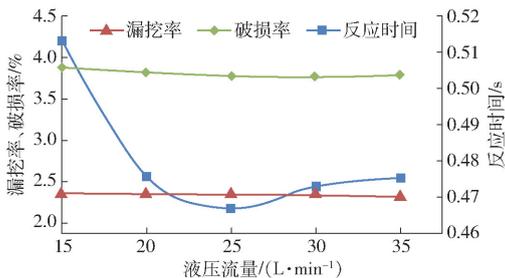


图 13 液压流量对各指标的影响

Fig. 13 Influence of hydraulic flow on indexes

由图 13 所示, 液压流量在 15 ~ 35 L/min 变化时, 漏挖率逐渐减小, 反应时间和破损率呈先减小后增加的趋势。

方差分析如表 7 所示, 结果表明, 在显著性水平  $\alpha=0.05$  下, 反应时间和破损率均满足  $P<0.01$ , 漏挖率  $P<0.05$ ; 液压流量对反应时间和破损率的影响均极显著, 对漏挖率的影响显著。

表 7 液压流量对各指标影响的方差分析

Tab. 7 Variance analysis of hydraulic flow on indexes

方差来源	平方和	自由度	均方	$F$	$P$	
$T$	组间	0.004	4	0.001	164.391	<0.000 1
	组内	0	10	0		
	总和	0.004	14			
$\eta_i$	组间	0.002	4	0.001	3.587	0.046
	组内	0.002	10	0		
	总和	0.004	14			
$\eta_p$	组间	0.021	4	0.005	28.696	<0.000 1
	组内	0.002	10	0		
	总和	0.023	14			

液压流量在一定的范围内增加, 液压纠偏执行机构移动相同距离的时间减小, 自动对行系统响应快, 所以反应时间、漏挖率和破损率逐渐减小。而当液压流量增加并超过了系统所需最佳流量后, 由于液压缸的运动过快, 液压纠偏执行机构出现超调, 导致往复振动, 所以系统反应时间和破损率会先减小后增加, 当流量  $q=25$  L/min 时, 破损率和反应时间最小, 分别为 3.77%、0.47 s。

### 3.6.4 偏离距离的影响

固定  $q=25$  L/min,  $F_y=198$  N,  $p_s=18$  MPa,  $v=1.2$  m/s,  $L=300$  mm, 偏离距离对自动对行性能指标影响的试验结果如图 14 所示。

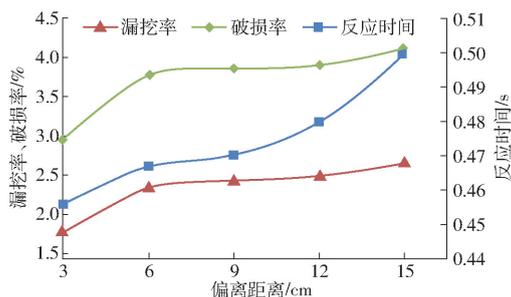


图 14 偏离距离对各指标的影响

Fig. 14 Influence of deviation distance on indexes

由图 14 可知, 反应时间、漏挖率和破损率随偏离距离的增加而逐渐增加, 且当偏离距离大于 9 cm 时, 反应时间快速增加。方差分析结果(表 8)表明, 偏离距离对反应时间、漏挖率和破损率的影响均极显著。

偏离距离增加, 探测杆的摆动角度增加, 导致偏离信号检测系统的信号提取时间增加, 同时液压油缸需运动的距离变大, 增加了液压纠偏执行机构的作用时间, 所以系统反应时间增加。偏离距离的增

表 8 偏离距离对各指标影响的方差分析

Tab. 8 Variance analysis of deviation distance on indexes

方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>	
<i>T</i>	组间	0.007	4	0.002	951.722	<0.000 1
	组内	0	10	0		
	总和	0.007	14			
$\eta_l$	组间	0.605	4	1.51	1 030.795	<0.000 1
	组内	0.001	10	0		
	总和	0.606	14			
$\eta_p$	组间	0.448	4	0.112	989.029	<0.000 1
	组内	0.001	10	0		
	总和	0.449	14			

大,使自动对行系统还未纠偏到位,挖掘机构已挖到了或驶过了偏离的甜菜块根,导致漏挖率和破损率的增加。当偏离距离小于 60 mm 时,系统纠偏较及时,漏挖率和破损率较小,所以偏离距离 *H* 为 0 ~ 60 mm 时,自动对行系统的适应性较好。

3.6.5 供油压力的影响

固定  $q = 25 \text{ L/min}$ ,  $F_y = 198 \text{ N}$ ,  $H = 60 \text{ mm}$ ,  $v = 1.2 \text{ m/s}$ ,  $L = 300 \text{ mm}$ , 供油压力对自动对行性能指标影响的试验结果如表 9 所示。

表 9 供油压力对各指标的影响

Tab. 9 Influence of oil pressure on indexes

供油压力 $p_s/\text{MPa}$	反应时间 <i>T/s</i>	漏挖率 $\eta_l/\%$	破损率 $\eta_p/\%$
15	0.468	2.34	3.77
18	0.467	2.34	3.77
21	0.467	2.35	3.78
24	0.469	2.69	3.80
27	0.469	2.35	3.79

对试验结果进行方差分析(表 10),结果表明,供油压力对反应时间、漏挖率和破损率的影响均不显著。

表 10 供油压力对各指标影响的方差分析

Tab. 10 Variance analysis of oil pressure on indexes

方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>	
<i>T</i>	组间	0	4	0	164.391	0.060
	组内	0	10	0		
	总和	0	14			
$\eta_l$	组间	0.287	4	0.072	1.044	0.432
	组内	0.688	10	0.069		
	总和	0.975	14			
$\eta_p$	组间	0.002	4	0.001	1.848	0.196
	组内	0.003	10	0		
	总和	0.005	14			

自动对行系统受供油压力的影响小,在保证液压纠偏执行机构所需动力的前提下对供油压力的适应性好,且各指标均在可接受的范围内。另由理论

分析可知,液压缸的实际工作压力由工作时的负载决定,供油压力只表明当液压缸工作负载增大时,液压系统可以提供的压力。所以,后续研究可忽略供油压力对各性能指标的影响。

3.6.6 株距的影响

固定  $q = 25 \text{ L/min}$ ,  $F_y = 198 \text{ N}$ ,  $H = 60 \text{ mm}$ ,  $v = 1.2 \text{ m/s}$ ,  $p_s = 18 \text{ MPa}$ , 株距对自动对行性能指标影响的试验结果如表 11 所示,方差分析结果如表 12 所示。

表 11 株距对各指标的影响

Tab. 11 Influence of beet spacing on indexes

株距 <i>L/mm</i>	反应时间 <i>T/s</i>	漏挖率 $\eta_l/\%$	破损率 $\eta_p/\%$
200	0.467	2.34	3.78
200	0.465	2.34	3.80
200	0.467	2.36	3.79
300	0.467	2.34	3.76
300	0.466	2.35	3.78
300	0.468	2.34	3.78
400	0.471	2.33	3.76
400	0.467	2.34	3.73
400	0.469	2.33	3.77

表 12 株距对各指标影响的方差分析

Tab. 12 Variance analysis of beet spacing on indexes

方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>	
<i>T</i>	组间	0	2	0	2.737	0.143
	组内	0	6	0		
	总和	0	8			
$\eta_l$	组间	0	2	0	2.167	0.196
	组内	0	6	0		
	总和	0.001	8			
$\eta_p$	组间	0.002	2	0.001	4.550	0.063
	组内	0.001	6	0		
	总和	0.003	8			

由表 11、12 可知,株距对反应时间、漏挖率和破损率的影响均不显著。自动对行系统受株距的影响小,各指标均在可接受的范围内;系统对株距的适应性好,后续研究可忽略株距对各性能指标的影响。

3.6.7 各因素对性能指标的综合影响分析

由以上各单因素试验结果可知,弹簧预紧力、前进速度、偏离距离和液压流量对各性能指标影响均显著,供油压力和株距对各性能指标影响不显著。随弹簧预紧力的增加(53 ~ 346 N),自动对行系统反应时间增加,漏挖率和破损率呈先减小后增大的趋势,且当预紧力为 198 N 时,漏挖率和破损率较低,分别为 2.34%、3.77%;随前进速度的增加(0.4 ~ 2.0 m/s),反应时间逐渐减小并趋于稳定,漏挖率和破损率呈逐渐增大趋势;液压流量在 15 ~ 35 L/min

变化时,漏挖率逐渐减小,反应时间和破损率先减小后增加的趋势,当液压流量  $q = 25 \text{ L/min}$  时,破损率和反应时间较小,分别为 3.77%、0.47 s。

根据各单因素试验结果并结合生产效率综合考虑,取可控因素前进速度  $v = 1.2 \text{ m/s}$ 、弹簧预紧力  $F_y = 198 \text{ N}$ 、液压流量  $q = 25 \text{ L/min}$  时,自动对行系统对田间种植农艺参数在偏离距离  $H$  为 0~60 mm、株距  $L$  为 200~400 mm 情况下的适应性较好,反应时间、漏挖率和破损率不超过 0.471 s、2.36% 和 3.80%。

## 4 结论

(1)以 4LT-A 型甜菜联合收获机为研究载体,进行了自动对行系统关键部件设计和关键参数分

析,建立了偏离距离检测机构角度变化量和液压纠偏执行机构液压油缸长度伸缩变化量与甜菜块根偏移量的数学模型。

(2)以漏挖率、破损率和反应时间为自动对行性能指标,以复位弹簧预紧力、前进速度、偏离距离、液压流量和供油压力为试验因素进行了单因素台架试验,研究分析了各因素对各性能指标影响的显著性及影响规律。

(3)试验结果表明,弹簧预紧力、前进速度、偏离距离和液压流量均对各性能指标影响显著,供油压力和株距对各性能指标影响不显著。当前进速度  $v = 1.2 \text{ m/s}$ 、弹簧预紧力  $F_y = 198 \text{ N}$ 、液压流量  $q = 25 \text{ L/min}$  时,自动对行系统的适应性较好,反应时间、漏挖率和破损率不超过 0.471 s、2.36% 和 3.80%。

## 参 考 文 献

- [1] 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)
- [2] MARCHANT W T B, CHITTEY E T. Automatic control of sugar beet harvester shares[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1966, 11(3):188-200.
- [3] O'DOHERTYM J. A geometrical model to define the limits of accuracy of sugar beet topping[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1986, 34(1):55-66.
- [4] O'DOHERTYM J. The design of feeler wheel toppers for sugar beet; I. Topper dynamics [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1986, 34(4):305-318.
- [5] PROCHAZKA J. Force relationships and power requirements of sugar beet shares[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1967, 12(2):152-170.
- [6] DAVIS P F. Computer simulation of a mechanism which cuts the tops off sugar beet[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1972, 17(3):271-280.
- [7] DAVIS P F. Statistical analysis of the shape and cutting planes of sugar beet crowns[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1977, 22(1):9-25.
- [8] BILLINGTON W P. The design and development of a skew bar topper for sugar beet[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1984, 29(4):329-335.
- [9] 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.
- [10] IVANCAN S, SITO S, FABIJANIC G. Factors of the quality of performance of sugar beet combine harvesters [J]. Die Bodenkultur, 2002, 53(3):161-166.
- [11] TILLET N D, HAGUE T, MILES S J. Inter-row vision guidance for mechanical weed control in sugar beet[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2002, 33(3):163-177.
- [12] VADIM T, WOLFRAM S, WITALI S, et al. Contactless sensor system for row navigation and automatic depth control for a sugar beet harvester using a 3D time of flight (ToF) camera[C]//World Conference on Computers in Agriculture and Natural Resources, San Jose Costa Rica, 2014:1-8.
- [13] 张国凤,徐文龙,范素香.切割厚度可调甜菜切顶机构的分析与参数优化[J].农业工程学报,2013,29(18):26-33.  
ZHANG Guofeng, XU Wenlong, FAN Suxiang. Analysis and parameter optimization of adjustable beet top cutting mechanism [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18):26-33. (in Chinese)
- [14] 李阳.甜菜仿形切削装置的设计研究[D].石河子:石河子大学,2015.  
LI Yang. Design and study of system of auto-picking and separating seedling for plug-transplanter [D]. Shihezi: Shihezi University, 2015. (in Chinese)
- [15] 王方艳,张东兴.圆盘挖掘式甜菜联合收获机设计与试验[J].农业工程学报,2013,29(13):7-14.  
WANG Fangyan, ZHANG Dongxing. Design and experiment of disc-dig sugar beet combine [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(13): 7-14. (in Chinese)
- [16] 李建东,杨薇,贾晶霞,等.自动随行导向的甜菜组合式挖掘装置[J].农业工程,2015,5(2):19-21.  
LI Jiandong, YANG Wei, JIA Jingxia, et al. Combined digging device with automatic accompanying guide for beet [J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(2):19-21. (in Chinese)

- WU Mingquan, NIU Zheng, WANG Changyao. Mapping paddy fields by using spatial and temporal remote sensing data fusion technology [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 2): 48–52. (in Chinese)
- [15] WU M Q, WU C Y, HUANG W J. An improved high spatial and temporal data fusion approach for combining Landsat and MODIS data to generate daily synthetic Landsat imagery[J]. Inform Fusion, 2016, 31(9): 14–25.
- [16] GAO F, MASEK J, SCHWALLER M, et al. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: predicting daily Landsat surface reflectance[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(8): 2207–2218.
- [17] HILKER T, WULDER M A, COOPS N C, et al. A new data fusion model for high spatial-and temporal resolution mapping of forest disturbance based on Landsat and MODIS [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(8): 1613–1627.
- [18] ZHU Xiaolin, CHEN Jin, GAO Feng, et al. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(11): 2610–2623.
- [19] WU M Q, NIU Z, WANG C Y, et al. Use of MODIS and Landsat time series data to generate high-resolution temporal synthetic Landsat data using a spatial and temporal reflectance fusion model[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2012, 6(1): 063507.
- [20] ZHANG Wei, LI Ailong, JIN Huaan, et al. An enhanced spatial and temporal data fusion model for fusing Landsat and MODIS surface reflectance to generate high temporal Landsat-like data[J]. Remote Sensing, 2013, 5(10): 5346–5368.
- [21] 邬明权, 牛铮, 王长耀. 多源遥感数据时空融合模型应用分析[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(5): 776–783.  
WU Mingquan, NIU Zheng, WANG Changyao. Assessing the accuracy of spatial and temporal image fusion model of complex area in South China [J]. Journal of Geo-information Science, 2014, 16(5): 776–783. (in Chinese)
- [22] ADAMS J B, SMITH M O, JOHNSO N, et al. Spectral mixture modeling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 site [J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 91(B8): 8089–8112.
- [23] TANRÉ D, HOLBEN B N, KAUFMAN Y J. Atmospheric correction algorithm for NOAA AVHRR products: theory and application [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(2): 231–248.
- [24] 宋春桥, 柯灵红, 游松财, 等. 基于 TIMESAT 的 3 种时序 NDVI 拟合方法比较研究——以藏北草地为例 [J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 147–155.  
SONG Chunqiao, KE Linghong, YOU Songcai, et al. Comparison of three NDVI time-series fitting methods based on TIMESAT—taking the grassland in Northern Tibet as case [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(2): 147–155. (in Chinese)
- [25] 石月婵, 杨贵军, 李鑫川, 等. 融合多源遥感数据生成高时空分辨率数据的方法对比[J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(1): 92–99.  
SHI Yuechan, YANG Guijun, LI Xinchuan, et al. Intercomparison of the different fusion methods for generating high spatialtemporal resolution data [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2015, 34(1): 92–99. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 112 页)

- [17] 苟爱梅. 甜菜切顶机的结构设计[J]. 新疆职业大学学报, 2012, 20(2): 75–77, 80.  
GOU Aimei. Structure design on the beet roof cutting machine [J]. Journal of Xinjiang Vocation University, 2012, 20(2): 75–77, 80. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 王申莹, 胡志超, 吴惠昌, 等. 基于 Proteus 的甜菜收获机自动对行控制系统设计仿真与试验[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(3): 35–40.  
WANG Shenying, HU Zhichao, WU Huichang, et al. Design simulation and test of auto-follow row control system employed in beet harvester based on Proteus [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(3): 35–40. (in Chinese)
- [20] 王申莹, 胡志超, 彭宝良, 等. 基于 ADAMS 的甜菜收获机自动对行探测机构仿真[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 62–67.  
WANG Shenying, HU Zhichao, PENG Baoliang, et al. Simulation of auto-follow row detection mechanism in beet harvester based on ADAMS [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 62–67. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20131211&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131211&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.011. (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] 顾峰玮, 胡志超, 吴惠昌, 等. 4LT-A 型错行作业挖掘甜菜联合收获机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 1–9.  
GU Fengwei, HU Zhichao, WU Huichang, et al. Development and experiment of 4LT-A staggered-dig sugar beet combine [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 1–9. (in Chinese)