

马铃薯收获机薯秧分离装置设计与试验

吕金庆¹ 王鹏榕¹ 刘志峰¹ 李紫辉¹ 邹法毅¹ 杨德秋²

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 针对北方粘重土壤条件下马铃薯收获过程中薯秧分离效果不佳的问题,设计了一种在不杀秧情况下既适用于大型联合收获机也适用于分段式马铃薯收获机的薯秧分离装置。通过对该装置升运过程中薯秧的运动学分析和分离过程中的力学分析,建立了一种弹性力学模型,确定了影响薯秧分离效果的主要因素,得到影响薯秧分离性能的摘秧辊转速范围和摘秧辊与一级升运分离筛主驱动辊距离范围等工作参数。以摘秧辊转速、一级升运分离筛主驱动辊线速度、摘秧辊与一级升运分离筛主驱动辊距离为试验因素,以含杂率为试验指标,在未进行杀秧作业的条件下进行田间试验,试验结果表明:当摘秧辊与一级升运分离筛主驱动辊距离为 2.5 mm、摘秧辊转速为 9.0 r/s、一级升运分离筛主驱动辊线速度为 1.6 m/s 时,含杂率为 2.4%,优于国家行业标准。

关键词: 马铃薯收获机; 薯秧分离装置; 弹性力学模型

中图分类号: S225.7⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)06-0100-10

Design and Experiment of Potato Harvester Potato Stem Separation Equipment

LÜ Jinqing¹ WANG Pengrong¹ LIU Zhifeng¹ LI Zihui¹ ZOU Fayi¹ YANG Deqiu²

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problems that potato stems trash separation was ineffective during the potato harvest, potato harvest potato stem separation equipment was designed under the condition of heavy soil in northern China. Based on the kinematics analysis of the potato stems during lifting process of device and the analysis of force during the separation process and elastic mechanics analysis during the separation process, an elastic mechanics model was established, the main factors affecting the separation effect of the yam were determined, and the picking roll speed affecting the separation performance was obtained. Taking the distance between the line speed, picking roll and the main driving roller of the first-stage lift separation screen as the test factor, and the field test was carried out with the impurity-containing test index. The test results showed that when the distance between picking roll and the main driving roller of the first-stage lift separation screen was 2.5 mm, the rotation speed of the picking roller was 9.0 r/s, and the linear speed of the main driving roller of the first-stage lifting separation screen was 1.6 m/s, the impurity content was 2.4%, and the index was superior to the national industry standard. The research result provided an important theoretical support and reference for both large combine harvesters and segmented potato harvesters, and also provided important theoretical support and technical reference for the separation of potato and potato stem during potato mechanical harvesting.

Key words: potato harvester; potato stem separation device; simulation model of elastic mechanics

0 引言

目前中国北方粘重土壤条件下,马铃薯收获机

械类型较多,但收获机械作业质量差别较大。主要表现在收获作业前、马铃薯杀秧作业后,秧蔓因表皮含水率过高而未完全木栓化,存在一定的韧性和强

收稿日期: 2018-12-20 修回日期: 2019-01-30
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701600、2017YFD0700705)、现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-09-P23)和北方马铃薯全程机械化科研基地项目(2017-A2231-230112-G1302-008)
作者简介: 吕金庆(1970—),男,研究员,主要从事马铃薯新型技术及装备研究,E-mail: lj888886666@163.com

度,此种工况下,未安装薯秧分离机构的马铃薯收获机作业时,薯土分离效果不佳,含杂率过高,收获质量下降;未进行杀秧作业,安装薯秧分离机构的马铃薯收获机作业时,容易出现杂草、秧蔓缠绕、堵塞薯秧分离装置,导致收获质量下降^[1-8]。所以,研究在未杀秧情况下减少马铃薯损伤同时提高分离效率的薯秧分离装置具有重要意义。

国外发达国家多采用大型马铃薯联合收获机进行收获作业,马铃薯联合收获机薯秧分离装置包括稀杆式茎叶分离器、薯块分离器以及联合升运分离器等,但上述薯秧分离装置均不适宜安装在中小型分段式马铃薯收获机上,且需要大功率驱动,油耗较大,不适宜北方一季作区的粘重土壤作业和小地块作业^[9-10]。中国马铃薯机械化收获主要采用分段收获,分段式马铃薯收获机体积小,适用于小地块收获,符合北方一季作区的作业条件;文献[11-12]设计的 4UFD-1400 型马铃薯联合收获机薯秧分离装置稳定性强,但结构复杂,适用于联合收获机,且未安装升运链与摘秧辊间距离的调节机构,无法根据实际作业情况,改变主要工作参数。甘肃省机械科学研究院荆毅设计的马铃薯挖掘机组薯根茎分离输送机构工作效率高,但一级升运链未配套副驱动辊,分离后的秧蔓跟随升运链向后运动,易造成堵塞机具等问题,不适用于在不杀秧情况下进行收获作业。

针对上述问题,本文设计一种在不杀秧情况下既适用于大型联合收获机、也适用于中小型分段式马铃薯收获机的薯秧分离装置,通过对薯秧分离过程中的运动学分析和分离过程中受力分析,以及分离过程中的弹性力学分析^[11-16],得出符合薯秧分离装置的结构参数与工作参数,并通过田间试验确定其最佳参数组合,以提高马铃薯收获机薯秧分离的效果,降低分离后的含杂率。

1 总体结构和工作原理

1.1 总体结构

设计的薯秧分离装置结构如图 1 所示,主要由挡秧杆机构、一级升运分离筛主驱动辊及副驱动辊、升运链、摘秧辊等组成。

1.2 工作原理

挖掘铲挖掘出的土薯、薯秧及杂草等混合物,沿铲面向上运动,进入一级升运分离筛,土壤通过链杆之间的间隙落下,实现了薯土分离,薯秧、杂草等依然在链条上随着马铃薯薯块向后输送,当输送至薯秧分离装置时,在挡秧杆机构的阻拦下,薯秧及杂草等送入摘秧辊与主驱动辊间的缝隙中,摘秧辊与主

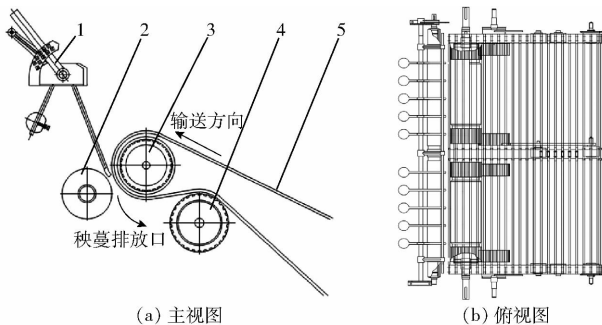


图 1 薯秧分离装置结构简图

Fig. 1 Structure diagram of potato stem separation device

1. 挡秧杆机构 2. 摘秧辊 3. 主驱动辊 4. 副驱动辊 5. 升运链

驱动辊间的距离可通过收获机侧板上的调节机构进行调节,因两辊转向相反,秧蔓及杂草被拽出并通过秧蔓排放口掉落在地上(如图 1 所示),在副驱动辊的作用下卷入一级升运分离筛中的秧蔓被排放掉落在地上,抓取力度可以通过调整挡秧杆条上方配重平衡球的位置以及摘秧辊与主驱动轮之间的缝隙大小进行调节。向上输送的薯块因形状类似椭圆或圆形,可直接通过薯秧分离装置,所以分离后的马铃薯薯块继续向后输送,直至被升运装车。

2 关键部件设计

2.1 摘秧辊

摘秧辊结构如图 2 所示,整个辊子表面均贴合橡胶,增大摩擦力,提高摘秧效率,防止辊子工作面被腐蚀,具有使用周期长、工作性能稳定、安装方便等优点;根据双行马铃薯收获机作业幅宽^[13],本文设计摘秧辊辊子直径为 83 mm,宽度为 1 825 mm。

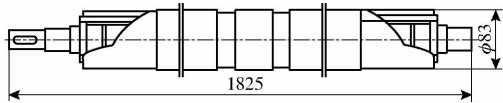


图 2 摘秧辊结构简图

Fig. 2 Structure diagram of potato stem removal roller

2.2 挡秧杆

挡秧杆的结构如图 3 所示,具有调节方便、薯块损伤率低等优点;本文设计的挡秧杆机构由挡秧杆、配重平衡球、机构调节臂等组成;整个挡秧杆机构通过调节臂支座安装在马铃薯收获机的侧板上,调节臂上设有 5 个挡位,调节角度范围在 15°~60°之间,调控挡秧杆与一级分离筛之间的距离,以便根据作业情况进行工作参数调整;北方马铃薯块茎长度在 80~110 mm 之间,为保证作业时薯块顺利通过,本文设计的挡秧杆间距为 120 mm,挡秧杆的下部套有橡胶管,当薯块通过挡秧杆的间隙时防止其磕碰损伤;配重平衡球单个质量 2 kg,可根据实际作业情况,调节配重平衡球安装位置,防止因工作量过大导

致的分离效果不佳等问题。

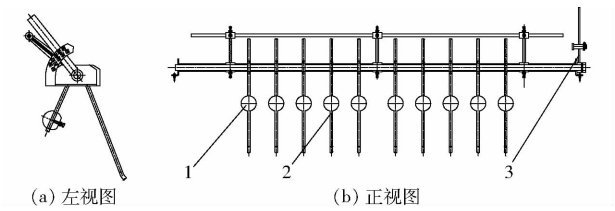


图3 挡秧杆结构简图

Fig. 3 Structure diagram of block potato stem pole

1. 配重平衡球 2. 挡秧杆 3. 机构调节臂

2.3 一级升运分离筛

一级升运分离筛主驱动辊结构如图4所示,因在未杀秧工况下进行作业,所以表面挂胶增大摩擦力,同时增大薯秧与分离筛的接触面积,提高摘秧效率;根据双行马铃薯收获机作业幅宽,本文设计一级升运分离筛主驱动辊辊子直径为194 mm,宽度为1 968 mm。

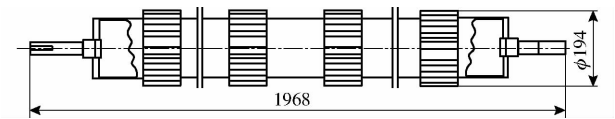


图4 主驱动辊结构简图

Fig. 4 Structure diagram of main drive roller

一级升运分离筛副驱动辊结构如图5所示,表面做挂胶处理,增大摩擦力,由于在未杀秧工况下进行作业,单一的升运分离筛易导致分离后的秧蔓跟随升运链向后运动,造成堵塞机具等问题,因此将副驱动辊安装在主驱动辊下方,工作时分离后的薯秧可在一级升运分离筛副驱动辊作用下直接掉落,具有防堵、辅助驱动升运链等优点;根据一级升运分离筛安装尺寸,本文设计一级升运分离筛副驱动辊辊子直径为194 mm,宽度为1 968 mm。

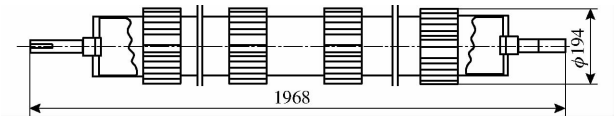


图5 副驱动辊结构简图

Fig. 5 Structure diagram of secondary drive roller

3 动力学分析及参数确定

为确定薯秧分离装置最佳的工作参数组合,对其工作过程进行分析,对摘秧过程中的薯秧进行运动学分析、力学分析以及弹性力学分析。薯秧分离装置的结构参数直接影响薯秧升运及分离时的运动状态,进而影响分离效果,其中摘秧辊和驱动辊的结构与工作参数以及摘秧辊与一级升运分离筛主驱动辊之间的距离是影响薯秧分离效果的主要因素。摘秧辊与一级升运分离筛主驱动辊之间的距离过大,会导致薯块与秧蔓分离效率低;距离过小,会堵塞分

离装置;摘秧辊和驱动辊组转速过快,会造成伤薯率偏高,且会导致整机结构过长;转速过慢,会造成升运效果不佳、含杂率过高等问题^[18]。所以针对摘秧辊与驱动辊组的结构与工作参数以及摘秧辊与一级升运分离筛主驱动辊之间距离的研究与确定具有重要意义。

3.1 摘秧过程运动特性分析

如图6所示,建立输送至主驱动辊顶端的薯秧物理模型,忽略秧蔓长度,将秧蔓与薯块看作同一整体进行运动学分析^[14-18]。

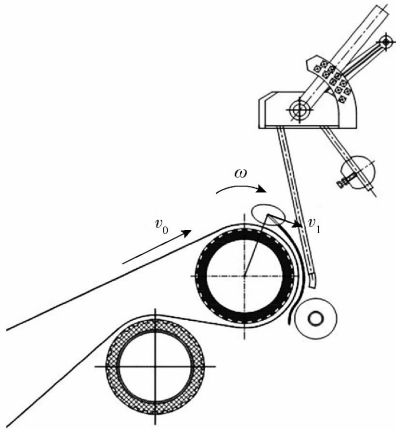


图6 薯秧分离运动分析

Fig. 6 Analysis of isolation movement of potato stem

薯块运动速度为

$$v_0 = v_1 = \omega r_1 = r_1 \frac{n_1 \pi d}{r_1} = n_1 \pi d = 2 \pi n_1 r_1 \quad (1)$$

式中 v_0 ——主驱动辊线速度, m/s
 v_1 ——薯块速度, m/s
 n_1 ——主驱动辊转速, r/s
 d ——主驱动辊直径, mm
 r_1 ——主驱动辊半径, mm
 ω ——主驱动辊角速度, rad/s

建立输送至主驱动辊顶端的薯秧物理模型,不忽略秧蔓长度,在挡秧杆的作用下将秧蔓导入摘秧辊的喂入部分,对其进行运动学分析,如图7a所示。

薯块绕薯秧底部 O_1 转动,对其进行运动学分析:以薯块质心 A 为研究动点,以此时主驱动辊线速度方向为 Y 轴反方向,垂直该线速度方向建立 X 轴。各个速度、加速度方向如图7所示,得出

$$\begin{cases} v_a = v_0 = v_1 = 2 \pi n_1 r_1 = \omega r_1 \\ v_e = v_a \sin \varphi \\ v_r = v_a \cos \varphi = \omega r_1 \cos \varphi \end{cases} \quad (2)$$

式中 v_a ——薯块绝对速度, m/s
 φ —— v_a 和 Y 轴夹角, ($^\circ$)
 v_e ——薯块牵连速度, m/s
 v_r ——薯块相对速度, m/s

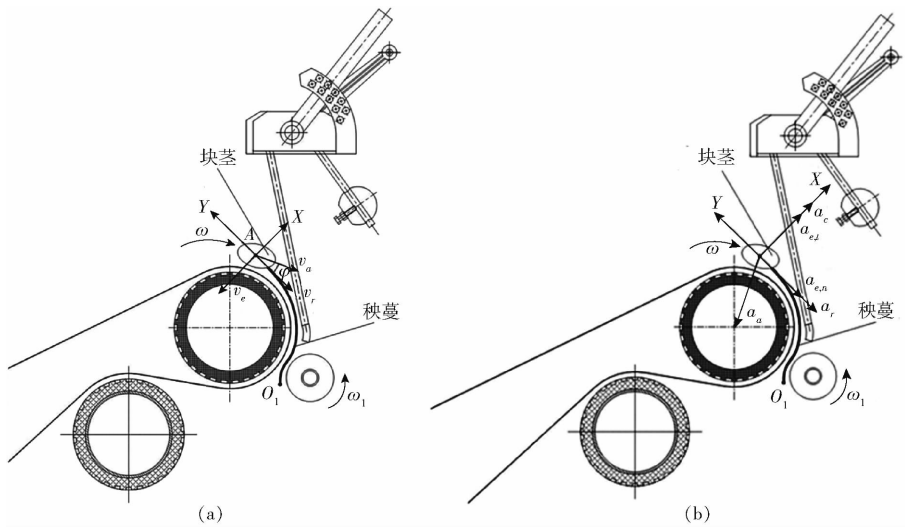


图 7 运动学分析
Fig. 7 Kinematic analysis

$$\begin{cases} a_c = 2v_r\omega_1\sin90^\circ = 2\omega_1\omega r_1\cos\varphi \\ a_{e,n} = \omega^2 l_2 \\ a_a = a_e + a_r + a_c \\ a_a = \left(r_1 + \frac{l_2}{2}\right)\omega^2 \end{cases} \quad (3)$$

将加速度向 X 轴投影,得

$$a_{e,t} = -\omega^2 r_1 \cos\varphi \quad (4)$$

所以 $a_{e,t}$ 方向与假设相反,角加速度为

$$\alpha = \frac{a_{e,t}}{l_2} = \frac{\omega^2 r_1 \cos\varphi + 2\omega_1\omega r_1 \cos\varphi}{l_2} \quad (5)$$

- 式中 a_a ——薯块绝对加速度, m/s^2
 a_e ——薯块牵连加速度, m/s^2
 a_r ——薯块相对加速度, m/s^2
 a_c ——科氏加速度, m/s^2
 ω_1 ——摘秧辊角速度, rad/s
 $a_{e,t}$ ——切向加速度, m/s^2
 $a_{e,n}$ ——法向加速度, m/s^2
 l_2 ——薯块长轴长度, mm

加速度不仅反映薯秧的运动状态,还影响薯块与秧蔓的分离过程中拉断力的大小。

3.2 摘秧过程力学分析及参数确定

在上述过程中,薯块受到力有:自身重力 G 、一级升运分离筛对其的支持力 F_N 、一级升运分离筛对其的摩擦力 f_1 ^[19-20]、秧蔓受到摘秧辊和主驱动辊共同提供的动摩擦力 F ,将 F 分解为 Y 轴方向 F_y 和 X 轴方向 F_x ,当动摩擦力大于薯块与秧蔓间的内力时,秧蔓被成功摘下,方向如图 8 所示。

当达到薯秧分离临界点时,以秧蔓为研究对象,对其进行受力分析。

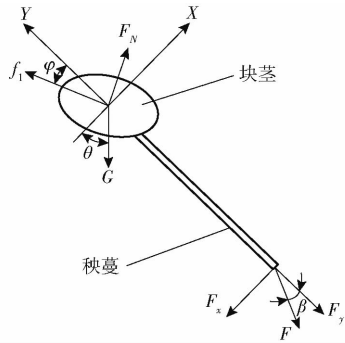


图 8 薯秧受力分析
Fig. 8 Stress analysis of potato stems

$$\begin{cases} F_N \sin\varphi + f_1 \cos\varphi = G \sin\theta + F_y \\ f_1 = \lambda F_N \\ \tan\beta = \frac{F_x}{F_y} \\ \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = F \\ T = F_x l_2 \end{cases} \quad (6)$$

- 式中 λ ——摩擦因数
 β ——摩擦力与 Y 轴夹角, $(^\circ)$
 θ ——重力 G 与 X 轴反向的夹角, $(^\circ)$
 T ——摩擦力对薯块的力矩, $\text{N}\cdot\text{m}$
转动惯量为

$$\begin{cases} J_o = J_{o1} + J_{o2} \\ J_{o1} = \frac{1}{3} m_1 l_1^2 \\ J_{o2} = J_c + m_2 \left(l_1 + \frac{d}{2}\right)^2 \end{cases} \quad (7)$$

整理得

$$J_o = \frac{1}{3} m_1 l_1^2 + m_2 \left(\frac{3}{8} d^2 + l_1^2 + l_1 d\right) \quad (8)$$

- 式中 m_1 ——秧蔓质量, kg

m_2 ——薯块质量, kg
 J_0 ——薯秧整体转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
 J_{01} ——秧蔓转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
 J_{02} ——薯块转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
 J_c ——薯块质心转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
 l_1 ——秧蔓长度, mm

拉断力 F_x 为

$$F_x = \frac{\left[\frac{1}{3} m_1 l_1^2 + m_2 \left(\frac{3}{8} d^2 + l_1^2 + l_1 d \right) \right] \alpha}{l_2} \quad (9)$$

其中
$$\alpha = \frac{a_{e,t}}{l_2} = \frac{\omega^2 r_1 \cos \varphi + 2 \omega_1 \omega r_1 \cos \varphi}{l_2}$$

整理得

$$F_x = \frac{\cos \varphi \omega r_1 (\omega + 2 \omega_1) \left(m_1 l_1^2 + \frac{9}{8} m_2 d^2 + 3 m_2 l_1^2 + 3 m_2 l_1 d \right)}{3 l_2^3} \quad (10)$$

查阅文献[21],薯秧拉断力为 0.23 ~ 0.35 kN, 北方一季作区马铃薯薯块质量为 100 ~ 380 g, 秧蔓质量 200 ~ 500 g, 秧蔓长度 800 ~ 1 200 mm, 根据上述分析, 由于在未杀秧条件下进行收获作业时田间薯秧的含水率较高、韧性较强, 且在粘重土壤条件下土壤石块等硬度较大、冲击力较强, 较小的升运链转速可有效降低种薯损伤, 较大的升运链转速可探究造成种薯损伤的临界条件, 故适当扩大速度选取范围, 寻找最优参数组合, 取摘秧辊转速为 3.0 ~ 9.0 r/s, 所以取一级升运分离筛主驱动辊的线速度为 0.8 ~ 2.4 m/s。

3.3 薯秧分离弹性力学模型建立及参数确定

薯秧在分离过程中会产生一定的弹性变形, 为更真实地模拟薯秧在分离过程中受力, 结合弹性力学将其离散化^[22-23], 如图 9 所示建立弹性力学模型, 其中单元 1 为秧蔓, 单元 2 为薯块, 当薯秧分离时, 薯块内部的秧蔓沿其轴线方向做线性运动, 共包括 3 个节点。

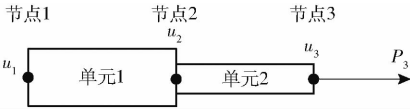


图 9 模型图

Fig. 9 Diagram of simulation model

图中 u_1 ——节点 1 位移, mm
 u_2 ——节点 2 位移, mm
 u_3 ——节点 3 位移, mm
 P_3 ——节点 3 右端所受外力, N

秧蔓沿其轴线方向运动, 选取薯块内部秧蔓分

离位置进行分析, 位移方程为

$$u_e(x) = a + bx \quad (11)$$

式中 a ——节点 i 的位移, mm
 b ——节点 j 的位移, mm

该部位模型如图 10 所示。

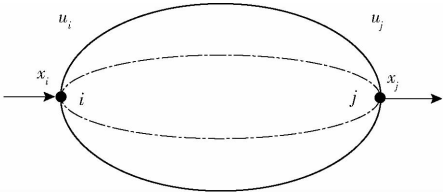


图 10 弹性力学模型图

Fig. 10 Diagram of simulation model of elastic mechanics

故对于节点 i 和节点 j , 当 $x = 0$ 和 $x = l$ 时有

$$\begin{cases} u_e(x) = u_i |_{x=0} \\ u_e(x) = u_j |_{x=l} \end{cases} \quad (12)$$

位移方程矩阵表达式为

$$u_e(x) = u_i + (u_j - u_i) \frac{x}{l} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{x}{l} & \frac{x}{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \end{bmatrix} = \mathbf{N}(x) \boldsymbol{\delta}^e \quad (13)$$

式中 l ——模型长度, mm

$\mathbf{N}(x)$ ——薯秧位移形状函数矩阵

$\boldsymbol{\delta}^e$ ——模型位移矢量矩阵

对于薯秧离散化模型, 整个系统势能为

$$\xi = \sum U_e - W_p \quad (14)$$

$$\begin{cases} U_e = A \int_0^l \frac{1}{2} \sigma \varepsilon dx = \frac{EA}{2} \int_0^l \varepsilon^2 dx \\ E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \end{cases} \quad (15)$$

式中 U_e ——应变能, J

W_p ——外力功, J

σ ——模型应力, Pa

ε ——模型应变

E ——模型弹性模量

A ——模型横截面积, mm^2

根据弹性力学位移与应变的关系, 并积分到应变能 U_e 的矩阵表达式

$$U_e = \frac{1}{2} \boldsymbol{\delta}_e^T \mathbf{K}_e \boldsymbol{\delta}_e \quad (16)$$

式中 $\mathbf{K}_e$ ——刚度矩阵

对于本模型 $P_1 = 0, P_2$ 为薯秧内力, 当

$$\frac{\partial \xi}{\partial \boldsymbol{\delta}} = 0 \quad (17)$$

得到平衡方程

$$\mathbf{K} \boldsymbol{\delta} - \mathbf{P} = 0 \quad (18)$$

式中 $\mathbf{P}$ ——节点力, N

$\mathbf{K}$ ——模型刚度矩阵

δ ——位移矢量

本模型节点位移、节点力矢量矩阵表达式为

$$\bar{\delta} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad (20)$$

刚度矩阵 K_e 为

$$K_e^{(1)} = \frac{E_1 A_1}{l_1} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1 A_1}{l_1} & -\frac{E_1 A_1}{l_1} \\ -\frac{E_1 A_1}{l_1} & \frac{E_1 A_1}{l_1} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$K_e^{(2)} = \frac{E_2 A_2}{l_2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_2 A_2}{l_2} & -\frac{E_2 A_2}{l_2} \\ -\frac{E_2 A_2}{l_2} & \frac{E_2 A_2}{l_2} \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中 E_1 ——模型 1 弹性模量

E_2 ——模型 2 弹性模量

A_1 ——模型 1 横截面积, mm^2

A_2 ——模型 2 横截面积, mm^2

由于总未知量有 3 个, 所以总刚度矩阵的阶数为 3, 查阅资料, 可采用将 K_e 中与 u_i 对应元素相加的方法处理, 总平衡方程矩阵表达式为

$$\begin{bmatrix} \frac{E_1 A_1}{l_1} & -\frac{E_1 A_1}{l_1} & 0 \\ -\frac{E_1 A_1}{l_1} & \frac{E_1 A_1}{l_1} + \frac{E_2 A_2}{l_2} & -\frac{E_2 A_2}{l_2} \\ 0 & -\frac{E_2 A_2}{l_2} & \frac{E_2 A_2}{l_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad (23)$$

查阅资料, 本模型按照规定位移的方法进行约束处理, 则节点 3 处的力为

$$P_3 = \frac{E_2 A_2}{l_2} (u_3 - u_2) \quad (24)$$

故分离力的大小与其力臂长度成反比, 根据实际经验, 摘秧辊与一级升运分离筛之间的距离为 2 ~ 5 mm, 为使装置正常工作, 且便于安装和调节, 设计摘秧辊与一级升运分离筛之间的距离为 2 ~ 3 mm。

综上所述, 一级升运分离筛主驱动辊转速、摘秧辊转速、摘秧辊和一级升运分离筛之间的距离直接影响薯秧分离的效果, 进而影响收获机的工作质量。

4 田间试验

4.1 试验条件

薯秧分离装置实际安装如图 11 所示, 为确定分离装置的最佳工作参数, 于 2018 年 9 月在黑龙江省农业科学院试验基地 (作业面积 4 hm^2 、黑粘土)、黑龙江省克山 (作业面积 4 hm^2 、黑粘土) 霜降前进行了田间收获试验, 试验前不进行杀秧作业, 薯秧含水率较低。试验地为旱地垄播, 试验区的垄长大于 500 m, 垄距为 800 mm, 垄高 280 mm, 耕作层土壤含水率范围为 7.9% ~ 16%。品种为: 大西洋、克新 19, 垄播株距约为 200 mm, 结薯深度为 180 ~ 330 mm。马铃薯挖掘机配套动力为约翰迪尔 1354 型拖拉机, 其功率为 100.7 kW, 田间作业情况如图 12 所示。

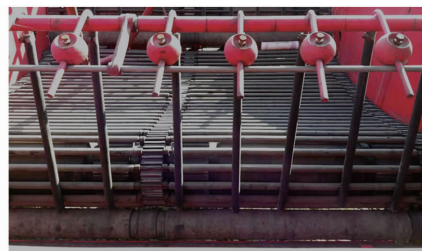
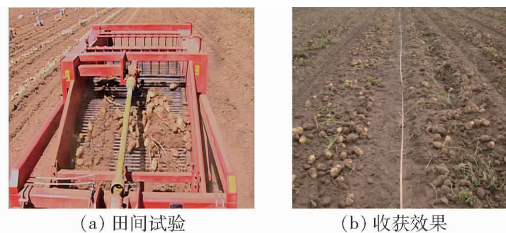


图 11 薯秧分离装置实物图

Fig. 11 Picture of potato stem separation device



(a) 田间试验

(b) 收获效果

图 12 收获试验

Fig. 12 Harvest experiment

4.2 评价指标

根据 NY/T 648—2015《马铃薯收获机质量评价技术规范》规定的试验方法, 在垄播旱地类型马铃薯种植田地进行收获试验。通过考察马铃薯收获机薯秧分离装置的分离效果, 以一级升运分离筛主驱动辊线速度、摘秧辊转速、一级升运分离筛主驱动辊与摘秧辊之间的距离为因素进行二次旋转正交组合试验, 测定含杂率为试验指标, 含杂率指薯箱中薯块的杂质含量, 为薯箱中杂质质量与杂质质量及薯块质量和的比值。试验完成后, 随机选取 5 组薯块进行数据采集测量^[23]。

4.3 试验方案及结果分析

4.3.1 试验方案及结果

采用二次正交旋转组合试验设计方法安排试验, 以含杂率为试验指标, 根据摘秧过程中的力学与运

动学分析得各因素水平范围:一级升运分离筛主驱动辊线速度为 0.8 ~ 2.4 m/s、摘秧辊转速为 3.0 ~ 9.0 r/s、一级升运分离筛主驱动辊与摘秧辊之间的距离为 2 ~ 3 mm,田间试验过程中由于所用拖拉机转速固定为 760 r/min,因此通过在收获机侧板安装齿轮箱,并根据计算设计出试验所需的 16、19、32 齿等齿数的齿轮,实现与一级升运分离筛、摘秧辊速度的匹配,通过收获机侧板上的调节机构实现一级升运分离筛主驱动辊与摘秧辊之间距离的改变。对试验结果进行分析,得到影响试验指标的显著性,根据实际作业需求对各参数组合进行优化,最终得到合适的各因素水平组合。试验因素编码如表 1 所示,试验方案及试验结果如表 2 所示。

表 1 试验因素编码			
Tab.1 Experimental factors and codes			
编码	因素		
	一级升运分离筛	摘秧辊转速	一级升运分离筛
	主驱动辊线速度		主驱动辊与摘秧
	$x_1/(m \cdot s^{-1})$	$x_2/(r \cdot s^{-1})$	辊距离 x_3/mm
1.682	2.40	9.00	3.00
1	2.08	7.78	2.80
0	1.60	6.00	2.50
-1	1.12	4.22	2.20
-1.682	0.80	3.00	2.00

4.3.2 试验结果分析

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行二次回归分析,并进行多元回归拟合,得到含杂率 Y

表 2 试验方案与结果				
Tab.2 Test plan and experimental results				
序号	因素			含杂率
	$x_1/(m \cdot s^{-1})$	$x_2/(r \cdot s^{-1})$	x_3/mm	$Y/\%$
1	1.12	4.22	2.20	3.9
2	2.08	4.22	2.20	3.4
3	1.12	7.78	2.20	2.9
4	2.08	7.78	2.20	2.4
5	1.12	4.22	2.80	3.7
6	2.08	4.22	2.80	3.5
7	1.12	7.78	2.80	2.9
8	2.08	7.78	2.80	2.6
9	0.80	6.00	2.50	3.6
10	2.40	6.00	2.50	2.8
11	1.60	3.00	2.50	3.9
12	1.60	9.00	2.50	2.4
13	1.60	6.00	2.00	3.2
14	1.60	6.00	3.00	3.5
15	1.60	6.00	2.50	3.3
16	1.60	6.00	2.50	3.3
17	1.60	6.00	2.50	3.4
18	1.60	6.00	2.50	3.4
19	1.60	6.00	2.50	3.4
20	1.60	6.00	2.50	3.3
21	1.60	6.00	2.50	3.5
22	1.60	6.00	2.50	3.4
23	1.60	6.00	2.50	3.3

作为试验指标的回归方程,并进行显著性检验。通过对试验数据的分析,对比不同因素水平下的含杂率,含杂率 Y 方差分析如表 3 所示。一级升

表 3 含杂率 Y 方差分析					
Tab.3 Variance analysis for impurity rate					
变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	3.71/3.69	9/6	0.41/0.62	64.89/97.72	<0.000 1 ***/ <0.000 1 ***
x_1	0.59/0.59	1/1	0.59/0.59	93.28/94.10	<0.000 1 ***/ <0.000 1 ***
x_2	2.84/2.84	1/1	2.84/2.84	446.10/450.04	<0.000 1 ***/ <0.000 1 ***
x_3	0.027/0.027	1/1	0.027/0.027	4.21/4.25	0.060 9 * /0.055 9 *
$x_1 x_2$	0.001 250	1	0.001 250	0.20	0.664 7
$x_1 x_3$	0.031/0.031	1/1	0.031/0.031	4.92/4.96	0.045 0 **/0.040 6 **
$x_2 x_3$	0.011	1	0.011	1.77	0.206 2
x_1^2	0.082/0.082	1/1	0.082/0.082	12.94/13.00	0.003 3 ***/0.002 4 **
x_2^2	0.13/0.13	1/1	0.13/0.13	20.08/20.20	0.000 6 ***/0.000 4 ***
x_3^2	0.005 678	1	0.005 678	0.89	0.361 8
残差	0.083/0.10	13/16	0.006 356/0.006 300		
失拟差	0.043/0.061	5/8	0.008 525/0.007 601	1.71/1.52	0.239 2/0.283 6
总和	3.79/3.79	22/22	22/22		

注:/后数字为剔除不显著因素后含杂率 Y 方差分析结果:***表示极显著 ($P < 0.01$);**表示显著 ($0.01 < P < 0.05$);*表示较显著 ($0.05 < P < 0.1$)。

运分离筛主驱动辊线速度 x_1 、摘秧辊转速 x_2 、一级升运分离筛主驱动辊线速度的二次项 x_1^2 和摘秧辊转速的二次项 x_2^2 对含杂率 Y 的影响极显著 ($P <$

0.01);一级升运分离筛主驱动辊线速度和一级升运分离筛主驱动辊与摘秧辊之间距离的交互项 $x_1 x_3$ 对含杂率 Y 的影响显著 ($0.01 < P < 0.05$);一级升

运分离筛主驱动辊与摘秧辊之间距离 x_3 对含杂率 Y 的影响较显著 ($0.05 < P < 0.1$)。其余因素对试验指标含杂率 Y 的影响不显著 ($P > 0.1$)。将不显著的交互作用项的回归平方及自由度并入残差项,再次进行方差分析,结果如表3所示,得到各因素对含杂率 Y 影响的回归方程

$$Y = 4.751\,83 - 0.437\,14x_1 - 0.070\,686x_2 + 0.086\,841x_3 - 0.014\,731x_1x_2 + 0.441\,94x_1x_3 + 0.070\,711x_2x_3 - 0.317\,92x_1^2 - 0.028\,163x_2^2 - 0.213\,86x_3^2 \quad (25)$$

对上述回归方程进行失拟检验,结果如表3所示,试验指标和试验因素存在显著的二次关系,分析结果合理。

4.3.3 响应曲面分析

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对数据的处理^[24-25],得出一级升运分离筛主驱动辊线速度 x_1 、一级升运分离筛主驱动辊与摘秧辊距离 x_3 影响含杂率 Y 的响应曲面,如图13所示。

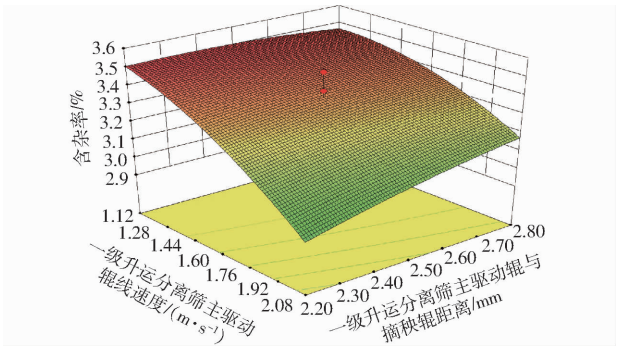


图13 因素影响含杂率的响应曲面

Fig. 13 Response surface of impurity rate

如图13所示,当分离筛与摘秧辊距离一定时,含杂率 Y 整体随着一级升运分离筛主驱动辊线速度的增加呈现逐渐减小的趋势,最优的一级升运分离筛主驱动辊线速度范围为 $1.43 \sim 2.08 \text{ m/s}$;当一级分离筛主驱动辊线速度一定时,含杂率 Y 整体上与分离筛主驱动辊与摘秧辊间距离成正相关,最佳距离范围为 $2.20 \sim 2.50 \text{ mm}$,其中一级升运分离筛主驱动辊线速度是影响含杂率的主要试验因素。

4.3.4 参数优化与验证

通过对图13中响应曲面的分析,为得到最佳的试验因素水平组合,利用 Design-Expert 8.0.6 软件中的优化模块对回归模型进行求解,根据马铃薯收获机作业时的实际工作条件、作业要求及上述相关理论模型分析结果选择优化约束条件^[28],为

$$\begin{cases} \min Y(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 1.43 \text{ m/s} \leq x_1 \leq 2.08 \text{ m/s} \\ 3.00 \text{ r/s} \leq x_2 \leq 9.00 \text{ r/s} \\ 2.2 \text{ mm} \leq x_3 \leq 2.5 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (26)$$

通过优化求解,得到一级升运分离筛主驱动辊线速度范围为 $1.43 \sim 2.08 \text{ m/s}$,摘秧辊转速范围为 $3.00 \sim 9.00 \text{ r/s}$,一级升运分离筛主驱动辊与摘秧辊距离范围为 $2.20 \sim 2.50 \text{ mm}$ 时,薯秧分离装置分离性能最好,含杂率为 $2.2\% \sim 3.0\%$ 。

4.4 验证试验

验证试验的试验条件和试验测试方法与正交试验相同,对经过改进设计和优化调节后薯秧分离装置的分离效果进行验证,并与标准作业指标进行对比,进而验证马铃薯收获机薯秧分离装置的分离性能。

马铃薯收获机薯秧分离装置结构参数和作业参数选择为:一级升运分离筛主驱动辊线速度为 1.6 m/s 、摘秧辊转速为 9.0 r/s 、一级升运分离筛主驱动辊与摘秧辊距离为 2.5 mm 。将上述因素水平进行验证试验,其中测量结果为3次测量的平均值,测得本设计的马铃薯收获机薯秧分离装置的含杂率 2.4% ,与优化所得结果基本一致,且均明显优于相关标准。其含杂率较低,是由于一级升运分离筛主驱动辊线速度足够大,能够使薯秧快速通过挡秧杆,并且迅速接触摘秧辊,使得薯秧顺利摘落,且摘秧辊转速和分离筛与摘秧辊之间距离等工作参数合理,提升分离效果,降低含杂率。验证试验表明相关优化组合合理,按优化参数调节后的马铃薯收获机薯秧分离装置有效提高了薯秧分离效果,满足作业要求。

5 结论

(1)设计的在不杀秧情况下既适用于大型联合收获机也适用于分段式马铃薯收获机的薯秧分离装置,能够满足旱地垄播条件下的马铃薯收获作业。该装置结构简单,提高了薯秧、杂草、地膜等杂物的分离效率。

(2)进行田间试验,建立了试验指标与影响因素的回归模型,并进行优化求解,试验结果表明:当一级升运分离筛主驱动辊线速度为 1.6 m/s 、摘秧辊转速为 9.0 r/s 、一级升运分离筛主驱动辊与摘秧辊距离为 2.5 mm 时,相应的试验指标含杂率为 2.4% ,该指标优于国家行业标准。

参 考 文 献

[1] 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. Present status and prospects of mechanical potato harvest technology[J].

- Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(1): 11–15. (in Chinese)
- [2] 王建波,樊啟洲,田延庆,等. 马铃薯挖掘机关键部件的研究现状与展望[J]. 农机化研究,2011,33(1):244–248.
WANG Jianbo, FAN Qizhou, TIAN Yanqing, et al. Research status and prospects of the key parts of potato digger[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(1):244–248. (in Chinese)
- [3] 吕金庆,田忠恩,杨颖,等. 马铃薯机械发展现状、存在问题及发展趋势[J]. 农机化研究,2015,37(12):258–263.
LÜ Jinqing, TIAN Zhongen, YANG Ying, et al. The development situation existing problems and development trend of potato machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015,37(12): 258–263. (in Chinese)
- [4] 吕金庆,孙贺,兑瀚,等. 粘重土壤下马铃薯挖掘机分离输送装置改进设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11): 146–155.
LÜ Jinqing, SUN He, DUI Han, et al. Design and experiment on conveyor separation device of potato digger under heavy soil condition[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 146–155. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171118&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.018. (in Chinese)
- [5] 姚贤良,程云生. 土壤物理学[M]. 北京:农业出版社,1986.
- [6] 刘宝,张东兴,李晶. MZPH-820型单行马铃薯收获机设计[J]. 农业机械学报,2009,40(5):81–86.
LIU Bao, ZHANG Dongxing, LI Jing. Design on MZPH-820 single-row potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 81–86. (in Chinese)
- [7] Cz. 卡那沃依斯基. 收获机械[M]. 曹崇文,吴春江,柯保康,译. 北京:中国农业机械出版社,1983.
- [8] 孟凤英,丁启朔,鹿飞,等. 冲击作用下粘性土壤破碎体的分形维数与影响因素[J]. 农业机械学报,2009,40(3):108–111,124.
MENG Fengying, DING Qishuo, LU Fei, et al. Fragmentation fractal dimensions of cohesive soil under impact and its influencing factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 108–111, 124. (in Chinese)
- [9] 吕金庆,魏国静,范志安,等. 4U-2B型马铃薯收获机的设计[J]. 农机化研究,2007,29(9):87–88.
LÜ Jinqing, WEI Guojing, FAN Zhian, et al. Design of 4U-2B potato harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(9):87–88. (in Chinese)
- [10] 王彦军. 4M-2型马铃薯联合收获机分离输送系统的研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2007.
WANG Yanjun. Research on separating and conveying system of the 4M-2 potato combine harvester[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- [11] 孙广辉,魏宏安,李彦晶,等. 4UFD-1400型马铃薯联合收获机薯秧分离装置设计[J]. 甘肃农业大学学报,2012, 47(6):146–150.
SUN Guanghui, WEI Hongan, LI Yanjing, et al. Development of potato stem separation devices of 4UFD-1400 potato combine harvester[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2012, 47(6): 146–150. (in Chinese)
- [12] 魏宏安,王蒂,连文香,等. 4UFD-1400型马铃薯联合收获机的研制[J]. 农业工程学报,2013,29(1):11–17.
WEI Hongan, WANG Di, LIAN Wenxiang, et al. Development of 4UFD-1400 type potato combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1):11–17. (in Chinese)
- [13] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 1版. 北京:机械工业出版社,1988.
- [14] 杨然兵,杨红光,尚书旗,等. 拨辊推送式马铃薯收获机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):119–126.
YANG Ranbing, YANG Hongguang, SHANG Shuqi, et al. Design and test of poking roller shoving type potato harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 119–126. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160717&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.017. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 张建. 4M-2型马铃薯联合收获机优化设计与仿真[D]. 兰州:甘肃农业大学,2008.
ZHANG Jian. Design and simulation of the 4M-2 potato combine harvester[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- [17] PLATT H W, CAMPBELL A J, BIRT I, et al. Modifications of a potato harvester for small plot field research[J]. American Potato Journal, 1990, 67(11): 799–803.
- [18] 陆祥辉,王昕,张文杰,等. 4U-1400马铃薯联合收获机分离输送装置的性能分析与试验[J]. 中国农业大学学报,2015, 20(6):269–276.
LU Xianghui, WANG Xin, ZHANG Wenjie, et al. Parameter analysis and experiment for separation conveyer of 4U-1400 type potato harvester[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(6): 269–276. (in Chinese)
- [19] 李凯锋,杨炳南,杨德秋,等. 胡萝卜物理力学特性的试验研究[J]. 农机化研究,2016,38(5):169–175,180.
LI Kaifeng, YANG Bingnan, YANG Deqiu, et al. Experimental research on physical and mechanical properties of carrot[J].

- Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(5): 169 – 175, 180. (in Chinese)
- [20] 王俊发, 马浏轩, 邵东伟, 等. 玉米根茬收获机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 68 – 72.
WANG Junfa, MA Liuxuan, SHAO Dongwei, et al. Design and experiment of maize root stubble harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 68 – 72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120613&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2012. 06. 013. (in Chinese)
- [21] 刘文政, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 125 – 135, 142.
LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Calibration of simulation parameters for potato minituber based on EDEM [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 125 – 135, 142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180514&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 05. 014. (in Chinese)
- [22] 贾晶霞, 杨德秋, 张东兴, 等. 马铃薯收获过程中块茎运动仿真分析[J]. 农机化研究, 2011, 33(8): 38 – 41, 50.
JIA Jingxia, YANG Deqiu, ZHANG Dongxing, et al. Moving simulation analysis on potato tuber during harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(8): 38 – 41, 50. (in Chinese)
- [23] MCRAE D C, HUTCHISON P S, CARRUTHERS J. Sieving control and horizontal agitation of potato harvester chains[J]. Transactions of the ASAE, 1986, 29(2): 366 – 369, 373.
- [24] 葛宜元, 梁秋艳, 王桂莲. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015.
- [25] 何为, 薛卫东, 唐斌. 优化试验设计方法与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
-

(上接第 27 页)

- [10] 刁智华, 赵明珍, 宋寅卯, 等. 基于机器视觉的玉米精准施药系统作物行识别算法及系统实现[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 47 – 52.
DIAO Zhihua, ZHAO Mingzhen, SONG Yinmao, et al. Crop line recognition algorithm and realization in precision pesticide system based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 47 – 52. (in Chinese)
- [11] 胡炼, 罗锡文, 曾山, 等. 基于机器视觉的株间机械除草装置的作物识别与定位方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 12 – 18.
HU Lian, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Plant recognition and localization for intra-row mechanical weeding device based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 12 – 18. (in Chinese)
- [12] 吴刚, 谭戡, 郑永军, 等. 基于改进 Hough 变换的收获机器人行走目标直线检测[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 176 – 179.
WU Gang, TAN Yu, ZHENG Yongjun, et al. Walking goal line detection based on improved Hough transform on harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 176 – 179. (in Chinese)
- [13] 孟庆宽, 何洁, 仇瑞承, 等. 基于机器视觉的自然环境下作物行识别与导航线提取[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 172 – 178.
MENG Qingkuan, HE Jie, QIU Ruicheng, et al. Crop recognition and navigation line detection in natural environment based on machine vision[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 172 – 178. (in Chinese)
- [14] 林伟明, 胡云堂. 基于 YUV 颜色模型的番茄收获机器人图像分割方法[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 176 – 180.
LIN Weiming, HU Yuntang. Image segmentation method based on YUV color space for tomato harvesting robot [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 176 – 180. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121232&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2012. 12. 032. (in Chinese)
- [15] 赵红雨, 吴乐华, 史燕军, 等. 基于 HSV 颜色空间的运动目标检测方法[J]. 现代电子技术, 2013, 36(12): 45 – 48.
ZHAO Hongyu, WU Lehua, SHI Yanjun, et al. Moving target detection method based on HSV color space [J]. Modern Electronics Technique, 2013, 36(12): 45 – 48. (in Chinese)
- [16] 杜凯, 宋永超, 巨永锋, 等. 改进的光照不变道路检测算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(5): 45 – 52.
DU Kai, SONG Yongchao, JU Yongfeng, et al. Improved road detection algorithm based on illuminant invariant [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(5): 45 – 52. (in Chinese)
- [17] LATEGAHN H, BECK J, KITT B, et al. How to learn an illumination robust image feature for place recognition[C] // Intelligent Vehicles Symposium (IV), IEEE, 2013: 285 – 291.
- [18] SHINZATO P, WOLF D. A road following approach using artificial neural networks combinations[J]. Journal of Intelligent & Robotic System, 2011, 62(3/4): 527 – 546.
- [19] ACHANTA R, SHAJI A, SMITH K, et al. SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2012, 34(11): 2274 – 2282.
- [20] CORTES C, VAPNIK V. Support-vector networks[J]. Machine Learning, 1995, 20(3): 273 – 297.