

整列定位夹切组合式马铃薯种薯切块装置设计与试验

王相友^{1,2} 刘为龙¹ 张浩^{2,3} 苏国梁^{2,3} 任加意¹

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255091; 2. 山东省马铃薯生产装备智能化工程技术研究中心, 德州 253600;

3. 山东思代尔农业装备有限公司, 德州 253600)

摘要: 针对目前马铃薯种薯切块机存在切种质量差和自动化程度低等问题, 基于切种农艺与农机相融合的设计思想, 设计了一种马铃薯种薯自动切块装置。通过整列定位输送机构完成种薯排列输送定位, 经夹持取料机构和切刀机构组合作用下完成种薯切块过程, 整机由 PLC 控制切块动作工序, 实现了切种流程的自动化。结合典型种薯几何尺寸参数, 完成马铃薯种薯切块装置的关键结构设计, 对种薯切块作业过程进行理论分析, 明晰影响种薯切块效果的主要因素和各因素的取值范围。以切种合格率、切种盲眼率为评价指标, 以圆台辊组中心距、链条输送速度、V 形刀具夹角为试验因素, 进行三因素三水平响应面试验, 通过 Design-Expert 12.0.3 软件对试验结果进行方差分析和交互作用分析, 利用软件优化模块确定试验最优参数组合。在最优参数组合条件下进行种薯切块试验验证, 验证结果表明: 当圆台辊组中心距为 101.60 mm、链条输送速度为 0.019 m/s、V 形刀具夹角为 49.50° 时, 切种合格率为 97.56%, 切种盲眼率为 1.27%, 与优化值相对误差小于 5%, 表明优化后最优参数组合可靠性高, 可以满足种薯切块要求。

关键词: 马铃薯种薯; 马铃薯切块机; 切块装置; 整列定位; 参数优化

中图分类号: S223.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)11-0148-11

OSID:



Design and Experiment of Seed Potato Cutting Device of Sorting-positioning and Clamping-cutting Combined

WANG Xiangyou^{1,2} LIU Weilong¹ ZHANG Hao^{2,3} SU Guoliang^{2,3} REN Jiayi¹

(1. College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255091, China

2. Shandong Intelligent Engineering Technology Research Center for Potato Production Equipment, Dezhou 253600, China

3. Shandong Star Agricultural Equipment Co., Ltd., Dezhou 253600, China)

Abstract: In response to problems of poor seed cutting quality and low degree of automation in seed potato cutting machine, based on the design idea of integrating seed cutting agronomy and agricultural machinery, an automatic cutting device suitable for seed potatoes was developed. The seed potato sorting and positioning were completed by sorting-positioning conveying mechanism, and the seed potato cutting process was completed by the combination of the clamping-picking and cutting mechanism. The machine was controlled by PLC to realize the cutting action process and realize the automation of the cutting process. Combined with typical seed potato geometric size parameters, the key structure design of the seed potato cutting device was completed, the process of seed potato cutting was theoretically analyzed, and the main factors affecting the seed potato cutting effect and the value range of each factor were clarified. The qualified rate of seed cutting and blind rate of seed cutting were taken as evaluation indexes, and the center distance of round table roll set, chain conveying speed and V-shaped cutter angle were taken as experimental factors. The response surface test of three factors and three levels was conducted. The analysis of variance and interaction of the test results were conducted by Design-Expert 12.0.3 software. The optimal parameter combination conditions of the test were determined by optimizing the module design of the software, and the seed potato slices were verified under the optimal parameter combination conditions. When the center distance of the round table rolls was 101.60 mm, the chain conveying speed was 0.019 m/s, and the angle of the V-type cutting tool was 49.50°, the qualified rate

收稿日期: 2023-07-08 修回日期: 2023-09-11

基金项目: 山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ010)

作者简介: 王相友(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品加工技术与装备研究, E-mail: wxy@sdut.edu.cn

of seed cutting was 97.56% , the blind rate of seed cutting was 1.27% , and the relative error with the optimized value was less than 5% , which indicated the optimized parameter combination had high reliability and can meet the requirements of potato seed cutting.

Key words: seed potato; seed potato cutter; cutting device; sorting-positioning; parameter optimization

0 引言

马铃薯是我国第四大主粮作物,每年种植面积约 $5 \times 10^6 \text{ hm}^2$,位居全球第一^[1-2]。目前我国对种薯需求量大,马铃薯种植以切块播种的垄作模式为主,且切块质量是影响播种后苗齐、苗壮及产量的关键因素^[3]。传统的人工切块模式效率低、不规范,易受人为主观因素制约,且种薯切块需要在播种前 2~3 d 进行,人力成本很高,不适合大规模种植^[4]。因此研制规范性强、自动化程度高的种薯切块装备成为实现马铃薯生产全程机械化的关键环节。

针对种薯切块装备,国内外学者和企业进行了相关研究^[5-6],美国 All Star Manufacturing & Design 公司研制了 4603 型种薯切块机^[7],该机集分选、切种、喷药、筛选于一体,但是该机型体积庞大、价格昂贵,且输送到圆盘切刀处的种薯杂乱无序,定位精度较差,容易将种薯切成片状或者楔状,薯种浪费严重;美国 Milestone 公司最新研制了 84-D 型双层种薯自动切块机^[8],该机采用双层切分作业模式,具备分级、切块、喷药等功能,种薯在辊筛和并联的圆盘刀配合下完成种薯纵向切分,随后较大的薯块经拨筛板引至横刀处进行再次切分,切种效率较高,但不能实现种薯空间姿态定位;比利时 Dewulf 公司研制了 PGS 型种薯切块机^[9],该机通过 4 排圆锥辊轮对种薯输送定位,经圆盘切刀进行切分,切分精度较高,实现了种薯空间姿态调整定位,但只能实现种薯对半切分,无法控制切块大小。近年来,国内相关专家学者也开始研制马铃薯制种装备,周树林^[10]研制了一款舀勺定刀式种薯切块装备,对种薯进行分级后通过不同型号的舀勺入料,并设有 3 种固定刀具对舀勺内种薯进行切分,但由于种薯在舀勺内空间姿态无法调控,切后种薯薯块大小不均匀;张国强^[11]设计了一款集成视觉可智能调控的马铃薯切种装备;冯伟等^[12]基于种薯分级机设计了一种集切块、排序、视觉筛选等功能的智能切块机,通过一形、Y 形、十字形切刀切分,切分后对无芽眼薯块进行剔除,但工作效率有待提高。综上所述,国外切种机以大型、集成化程度比较高的切种装备为主,但制造成本较高,且对我国现有种植农艺适应性较差,不适合我国市场;而国内对切种装备研究尚属于起步阶段,

目前切种装备研究主要集中在提高切种的效率和切割精度上,尚无较成熟机型转化应用,亟需加大装备的研发力度。

针对以上问题,基于我国种薯切种的农艺要求,并借鉴国内外相关技术,本文设计一种集成种薯整列定位、气动夹持取料、定位切分等流程的新型种薯切块装置,对切块装置关键结构进行设计与分析,并明晰影响切块效果的主要因素及各因素的取值范围,搭建试验台架进行探究,得到种薯切块装置最佳工作参数组合,以期马铃薯种薯自动化切块研究提供技术思路。

1 马铃薯切种农艺要求

马铃薯是块茎繁殖作物,一般来说种薯尺寸不一且芽眼较多,需要对种薯切块处理,种薯切块后薯块内部接触空气有利于提前打破休眠,出苗早且整齐,幼苗长势旺盛,能够节约薯种、提高产量^[13]。根据播种农艺要求,需要保证切后薯块单质量为 35~70 g 且保留一个以上健康芽眼,一般选用不同尺寸、健康种薯切块播种,质量 70 g 以下可以进行整薯播种;质量 70~140 g 种薯,纵向一切 2 块;质量 140~210 g 种薯,采用 V 形刀切分为 3 块;质量 210~300 g 种薯,采用十字切割方法切分为 4 块,切种农艺要求如图 1 所示。目前种薯切种流程通常采用流水线作业方式,包括种薯分级、种薯切块、消毒等处理,马铃薯种薯切块处理流程如图 2 所示,本文设计主要针对质量 140~210 g 的种薯,该装置设有喷头间歇地向切刀喷洒 1% 的高锰酸钾溶液来实现切分刀具消毒,切种后的种薯薯块需用草木灰拌种,可以有效消毒杀菌,避免细菌感染切口。

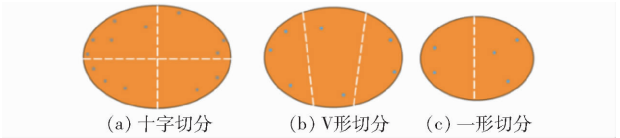


图 1 马铃薯种薯切块农艺要求

Fig. 1 Seed potato cutting agronomic requirements

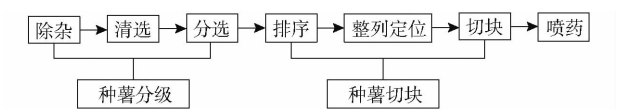


图 2 马铃薯种薯切块流程图

Fig. 2 Flowchart of seed potato cutting

2 整机结构与工作原理

2.1 整机结构

马铃薯种薯切块装置试验台主要包括整列定位输送机构、夹持取料机构、切块机构、下料输送机构、动力驱动系统及 PLC 控制系统,其中整列定位输送机构由链条驱动电机、辊组输送链条、圆台辊组以及齿轮齿条机构等构成;夹持取料机构主要由伺服电机、取料气缸、手指气缸、齿轮齿条副、直线导轨等构成;PLC 控制系统主要由 PLC 控制器、角度编码传感器、光电开关传感器、磁性开关感应器、电磁阀、变频器以及伺服控制器等构成。试验台前端两侧均安装防护板,为了便于展示其内部结构图 3 中未示出,马铃薯种薯切块机装置试验台结构如图 3 所示,主要技术参数如表 1 所示。

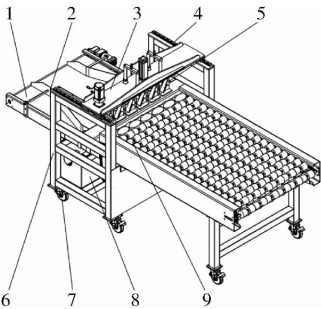


图 3 马铃薯种薯切块装置试验台结构图
Fig.3 Structure diagram of test bench of seed potato cutting device

1. 下料输送机构 2. 引流挡板 3. 夹持取料机构 4. 移动导轨组件 5. 切刀机构 6. 机架 7. 刹车脚轮 8. 配电箱 9. 整列定位输送机构

表 1 马铃薯种薯切块装置试验台主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of test bench of seed potato cutting device

参数	数值
试验台尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	3 400×1 540×1 600
试验台质量/kg	1 200
链条输送电机功率/kW	0.75
伺服电机功率/kW	0.75
下料输送电机功率/kW	0.2
切块工位数量/个	6
切块效率/(t·h ⁻¹)	1.2
使用气源压力/MPa	0.3~0.8
切后薯块质量/g	35~65
适用切块种薯质量/g	140~210

2.2 工作原理

根据种薯切块作业流程,切块装置首先通过整列定位辊组实现种薯多通道有序排列,调整种薯有相对精确的切分位置,通过设计不同的辊组、夹爪以

及切刀类型实现分级后种薯一次性均匀切分。具体工作流程如下:首先该切种装置配合分级装置以及上料装置使用,经上料提升装置以及振动排序装置有序地向辊轮窝眼内充填种薯单体,通过相关传感器、感应器以及按钮开关实现切块装置机械联动动作,样机整体运动的动力由气缸以及驱动电机提供,种薯切块作业控制原理如图 4 所示。本机运作由 PLC 程序控制,经整列定位辊组带动种薯不断调整空间姿态,在摩擦力作用下实现成排种薯等间距排列,安装于链条驱动电机轴端的角度编码传感器实时反馈位移信号与速度信号,当排列整齐的种薯到达预设的取料作业区时,手指气缸夹取第一排种薯,手指气缸磁性开关感应器感应夹持状态,取料过程伺服电机根据角度编码传感器实时反馈的速度脉冲信号保持同步跟随运动,随后取料气缸上升复位完成取料动作,此时 PLC 控制器向伺服电机发送加速脉冲信号指令,即伺服电机输出原定速度 20 倍快速行至切刀处完成切分并返回零点复位,等待下组种薯到位信号,切好的种薯薯块通过下料输送机构完成下料,完成单组种薯切块流程,等待下一步收集装袋处理。

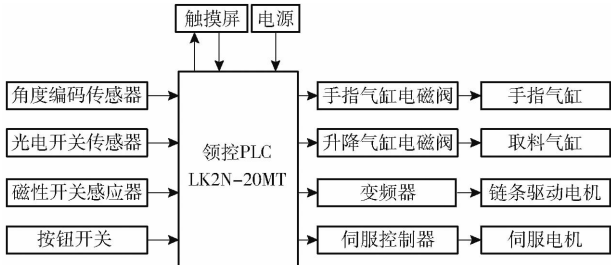


图 4 种薯切块作业控制原理图

Fig.4 Seed potato cutting operation control schematic

3 关键结构设计

3.1 整列定位输送机构设计

整列定位输送机构是实现种薯准确切分的核心部件,主要由链条驱动电机、主从动链轮、驱动链条、输送链条、旋转齿轮、旋转齿条及圆台辊轮等构成,其主要作用是使均匀落入相邻圆台辊轮窝眼内的种薯单体调整为长轴与辊轴平行状态,并以相对稳定的定向排列状态将种薯输送至取料位置等待夹持取料机构的取料处理,结构如图 5 所示。

3.1.1 圆台辊组设计

圆台辊组是整列定位机构的重要组成部分,有利于调整种薯在输送过程的运动状态。圆台辊组由圆台辊轮、辊轴、旋转齿轮、轴套、轴承等构成,结构如图 6 所示。圆台辊组由 12 个圆台辊轮单体组合而成,每 2 个圆台辊轮单体相对安装并固连于辊轴

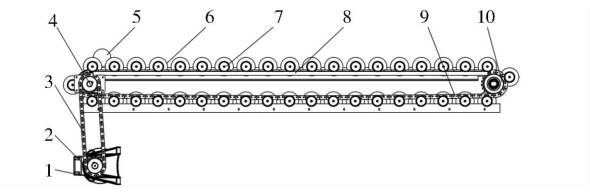


图 5 整列定位输送机构结构图

Fig. 5 Structure diagram of sorting-positioning conveyor mechanism

1. 链条驱动电机 2. 主动链轮 3. 驱动链条 4. 从动链轮
5. 输送种薯 6. 圆台辊轮 7. 旋转齿轮 8. 旋转齿条 9. 输送链条 10. 驱动链轮

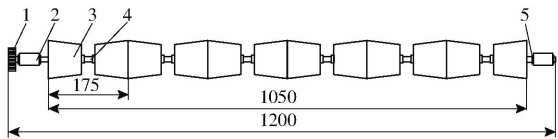


图 6 圆台辊组结构图

Fig. 6 Structure diagram of round table roller group

1. 旋转齿轮 2. 轴套 3. 圆台辊轮 4. 辊轴 5. 轴承

上形成一体,旋转辊轴两端对称设有轴套,轴套内置轴承与辊轴旋转连接,圆台辊组一侧固定有旋转齿轮,旋转齿轮在与固定齿条配合下形成强制转动机构,考虑到整列定位效果,旋转齿轮与固定齿条有效啮合距离为 1 800 mm,旋转齿轮分度圆直径为 12 mm,圆台辊组在传动链条驱动下做牵引运动,同时在齿轮齿条机构啮合作用下形成自转。圆台辊轮材料选用聚氨酯橡胶,相邻辊组形成窝孔,可以实现 6 个种薯同步作业,根据种薯分级后的尺寸参数,设计 2 对安装圆台辊轮轴向距离为 175 mm,圆台辊轮安装总长为 1 050 mm。

3.1.2 圆台辊轮设计

圆台辊组的核心部件为圆台辊轮,考虑到种薯整列定位精度,参考同类型整列定位辊轮机构以及结构参数,发现辊轮两侧锥度的设计具有良好的导向定位作用,可以有效防止种薯沿辊轮做轴向移动^[14-16],本文选用设有锥度的圆台辊轮。统计分级后质量 140~210 g 的“荷兰 15 号”种薯品种三轴尺寸参数,该种薯长度主要分布范围为 70~95 mm,宽度主要分布范围为 50~70 mm,高度主要分布范围为 45~65 mm,占比分别为 96.36%、95.47%、94.57%。为提高机器对相近尺寸种薯的适应性,关键尺寸参数选取均保留一定的设计余量,确定圆台辊轮上底面直径 D_1 为 33 mm、下底面直径 D_2 为 42 mm、圆台辊轮高度 H 为 72 mm,呈对称安装的两相邻圆台辊轮间距 b 设计为 30 mm,便于夹爪夹取种薯,两辊之间锥形设计使得相邻辊轮形成菱形定位空间,便于种薯在窝孔内空间姿态调整,圆台辊轮结构如图 7 所示。

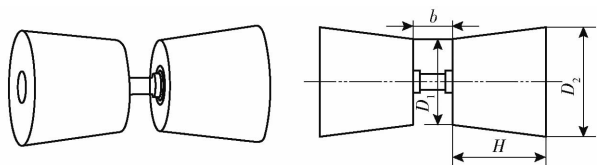


图 7 圆台辊轮结构图

Fig. 7 Structure diagrams of round table rollers

3.1.3 种薯输送过程力学分析

种薯进入整列定位输送机构后与圆台辊轮接触,圆台辊轮在电机驱动下向前运动的同时绕轴线自转,种薯受到辊轮摩擦力的作用以一定角速度转动,经过一段时间的空间姿态调整后种薯中心与切刀对称中心保持同一平面,从而达到种薯定位排列目的,将种薯简化为质量分布均匀的椭球体刚体,假定种薯与两侧圆台辊轮接触面在同一竖直面,将种薯翻转转动横截面理想化为圆面,单体种薯在辊轮上受力分析如图 8 所示,其中 O 为种薯重心, O_1 、 O_2 为两侧圆台辊轮重心, R_1 为种薯接触点辊轮半径, R_2 为圆台辊轮底面半径, f_1 、 f_2 为两侧圆台辊轮对种薯的滑动摩擦力, N_1 、 N_2 为两侧圆台辊轮对种薯的支持力, mg 为种薯重力, V_1 为链条输送速度, ω_1 为两侧圆台辊轮自转角速度, ω_2 为种薯自转角速度, α_1 、 α_2 为两侧圆台辊轮对种薯支持力与竖直方向夹角, L_1 为左右两侧圆台辊轮中心距。

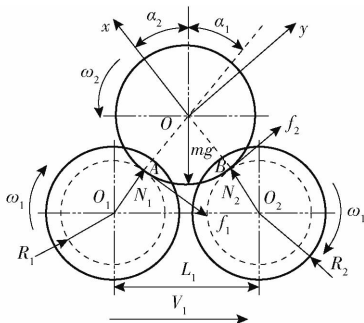


图 8 种薯输送过程受力分析

Fig. 8 Stress analysis of potato conveying process

当种薯处于动态平衡状态时,此时种薯在间隔一定距离的圆台辊轮间以一定的速度在窝孔保持转动,在不考虑离心力影响条件下,种薯在特定位置保持稳定转动且不越过圆台辊轮条件之一是接触点 B 的合力矩 M_B 小于或等于 0,即

$$\sum M_B = N_1 R \sin(\pi - \alpha_2 - \alpha_1) - mg R \sin \alpha_2 - f_1 R \left(1 + \sin \left(\alpha_1 + \alpha_2 - \frac{\pi}{2} \right) \right) \leq 0 \quad (1)$$

式中 R ——种薯等效旋转半径

种薯在特定位置保持稳定转动而不越过圆台辊轮的另一个条件是在接触点 A 和点 B 的切线上合力 F_A 、 F_B 均小于或等于 0,即

$$\sum F_A = N_2 \sin(\pi - \alpha_1 - \alpha_2) - mgsin\alpha_1 + f_1 - f_2 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1 - \alpha_2\right) \leq 0 \quad (2)$$

$$\sum F_B = N_1 \sin(\pi - \alpha_1 - \alpha_2) - mgsin\alpha_2 + f_2 - f_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1 - \alpha_2\right) \leq 0 \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} f_1 = \mu_0 N_1 \\ f_2 = \mu_0 N_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中 μ_0 ——种薯与圆台辊轮间静摩擦因数

分别连接种薯重心、左右两侧圆台辊轮重心,几何连接图如图 9 所示,根据余弦定理得数学关系式为

$$\cos(\alpha_1 + \alpha_2) = \frac{2(R + R_1)^2 - L_1^2}{2(R + R_1)^2} \quad (5)$$

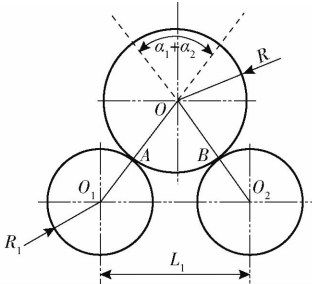


图 9 几何连接图

根据式(1)~(5)可知,种薯受接触点合力矩驱动下在圆台辊轮窝眼内保持转动,当种薯尺寸和圆台辊轮半径一定时,种薯受左右侧圆台辊轮支持力 N_1 、 N_2 与竖直方向的夹角 α_1 、 α_2 的变化主要受两圆台辊轮中心距的影响,当圆台辊组中心间距越小时,相邻窝眼内种薯易发生干涉,影响定位排列运动,同时夹取时夹爪与相邻窝眼内待取种薯发生干涉;当圆台辊组中心间距越大时,种薯所受左右侧圆台辊轮支持力 N_1 、 N_2 与竖直方向间的夹角 α_1 、 α_2 将变大,由式(1)~(3)可知,中心间距过大将导致合力矩不足以驱动种薯转动,影响整列定位作业质量。综合种薯尺寸参数以及圆台辊轮设计参数,圆台辊组中心距设计范围取 95~105 mm。

3.1.4 种薯输送过程动力学分析

种薯在圆台辊轮转动下存在 2 种运动形式:
①种薯与辊轮接触后,在摩擦力的作用下既滚动又滑动过程,存在摩擦损耗,导致种薯滚动速度损失。
②纯滚动无滑动过程,既种薯与圆台辊轮接触点具有相同线速度。当种薯落入圆台辊轮窝眼中时,种薯在链条带动作用向前运动,同时在齿轮齿条强制转动下由静止状态做定向翻转运动,此时种薯在圆台辊轮上会发生打滑,当种薯加速至与辊子接触点线速度接近时,种薯运动可以等效为纯滚动过程。

假定种薯与圆台辊轮动摩擦因数为定值,种薯落入圆台辊轮窝眼中,由静止以角加速度加速到种薯与圆台辊轮接触点角速度稳定的过程,运动学方程为

$$\varphi = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (6)$$

$$\omega_2 = \omega_0 + \alpha t \quad (7)$$

式中 φ ——种薯翻转角度,rad
 t ——种薯翻转时间,s
 ω_0 ——种薯初始角速度,rad/s
 α ——种薯翻转角加速度,rad/s²
 ω_2 ——种薯转动角速度,rad/s

种薯在整列定位机构中处于相对稳定状态后,种薯接触点自转线速度与圆台辊轮接触点线速度相同,种薯运动过程等效为截面半径为 R 的圆沿直线滚动过程,圆上线性加速度是恒定的,表面无滑动,如图 10 所示,以种薯与近似轨道平面接触点为原点建立直角坐标系 xO_3y ,当种薯转动角度为 α_3 时,取种薯截面半径上任意一点 $D(x,y)$ 经历时间 t 的运动方程为

$$\begin{cases} x = R(\omega_2 t - \sin(\omega_2 t)) \\ y = R(1 - \cos(\omega_2 t)) \end{cases} \quad (8)$$

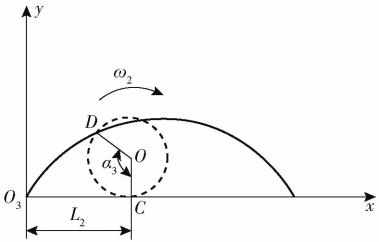


图 10 种薯稳定转动示意图

Fig. 10 Diagram of potato stable rotation

将运动方程式(8)对时间 t 进行求导,分别得到点 D 沿直角坐标系 x 、 y 方向上的水平速度 v_x 和竖直速度 v_y 为

$$\begin{cases} v_x = R\omega_2(1 - \cos(\omega_2 t)) \\ v_y = R\omega_2 \sin(\omega_2 t) \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)对时间 t 求导后得到在直角坐标系 x 、 y 方向上的水平加速度 a_x 和竖直加速度 a_y 为

$$\begin{cases} a_x = R\omega_2^2 \sin(\omega_2 t) \\ a_y = R\omega_2^2 \cos(\omega_2 t) \end{cases} \quad (10)$$

分别将速度和加速度矢量合成可得

$$\begin{cases} v_D = 2R\omega_2 \sin \frac{\omega_2 t}{2} \\ a_D = R\omega_2^2 \end{cases} \quad (11)$$

对移动时间 t 积分,求得在移动时间 t 内点 D 的运动轨迹方程为

$$S=4R\left(1-\cos\frac{\omega_2t}{2}\right)$$

(12)

将式(12)分别沿弧坐标系 t 与 n 两方向上对时间 t 求导,得关系式

$$\begin{cases} a_t=R\omega_2^2\cos\frac{\omega_2t}{2} \\ a_n=R\omega_2^2\sin\frac{\omega_2t}{2} \end{cases}$$

(13)

由曲率半径 ρ 与法向加速度和速度之间的关系可得

$$\rho=4R\sin\frac{\omega_2t}{2}$$

(14)

根据式(8)~(14)可知,当点 D 运动至与等效平面接触时,即点 D 与 x 轴重合,此时点 D 的速度为 0,这表明种薯沿着等效平面纯滚动时与平面接触点的相对速度为 0,但此时加速度不为 0,大小为 ω_2^2R ,加速度方向朝上。种薯运动轨迹主要受转动角速度 ω_2 的影响,转动角速度 ω_2 越大,其运动轨迹的曲率半径 ρ 越大,圆弧越平缓,因而种薯运动越稳定;转动角速度 ω_2 越小,其运动轨迹的曲率半径 ρ 越小,圆弧越陡,致使种薯起伏运动,影响后续种薯的取料作业稳定性,因而需要确定合适的转动角速度来满足种薯较快达到稳定状态。

种薯处于相对稳定状态后,种薯在圆台辊轮上做纯滚动,种薯接触点转动线速度 V_0 与圆台辊轮转动线速度 V_1 相等,即

$$\omega_2R=\omega_1R_1$$

(15)

又因为圆台辊轮角速度由链条输送速度 V_1 产生,即

$$V_1=\omega_1R_2$$

(16)

联立式(15)、(16)可得

$$\omega_2=\frac{R_1V_1}{R_2R}$$

(17)

结合式(15)~(17)分析可知,在圆台辊轮半径以及种薯尺寸一定条件下,影响种薯稳定排列运动状态的主要因素为链条输送速度 V_1 ,依据本文种薯取料设定作业周期并结合单因素试验,确定链条输送速度最佳范围为 0.015~0.025 m/s。

3.2 夹持取料机构设计

夹持取料机构对呈纵向排列的种薯成组抓取,并带动种薯运行至切刀处,完成切块过程,其主要由升降气缸、手指气缸、夹爪、伺服电机、齿轮齿条副、导向轴、油压缓冲器、直线滑轨及安装板构成,结构如图 11 所示。设计夹持取料相关组件数量为 6 组,可实现一组 6 个种薯同步作业,当种薯定位至指定取料作业位置时,伺服电机驱动齿轮齿条副拖动手

指气缸进行横向移动,前后移动行程设置为 265 mm,手指气缸呈张开状态,升降气缸驱动手指气缸下降至抓取位置,手指气缸在夹取种薯的同时随输送装置做同步运动,随后将种薯提升至切块高度,提升到位后伺服电机收到加速命令,将夹持取料机构整体以一定加速度运行至切刀处,完成一组种薯切块过程,最后控制夹持取料机构复位,等待下次取料命令。

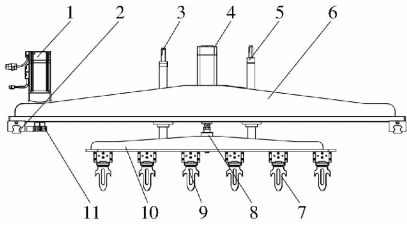


图 11 夹持取料机构结构图

Fig. 11 Structure diagram of clamping-picking

1. 伺服电机 2. 直线滑轨 3. 导向轴 4. 升降气缸 5. 油压缓冲器 6. 气缸安装板 7. 夹爪 8. 浮动接头 9. 手指气缸 10. 手指气缸安装板 11. 齿轮齿条副

手指气缸主要夹持部位为种薯中段部位,主要通过增加气压以及接触点摩擦力实现抓取以及种薯稳定切分^[17-18]。为了便于夹爪进行取料动作,夹爪宽度设计为 26 mm,与圆台辊轮轴向间隙相适配。为保证种薯夹持输送的可靠性以及防止种薯创伤,需选用合适夹紧力的手指气缸,种薯单体夹持状态受力分析如图 12 所示,稳定夹持固定条件为

$$\begin{cases} n(f_3+f_4)>mg \\ f_3=f_4=\mu_1F \end{cases}$$

(18)

式中 n ——夹爪数量

F ——手指气缸夹持力, N

μ_1 ——种薯与软垫间静摩擦因数

f_3 ——种薯左侧所受摩擦力, N

f_4 ——种薯右侧所受摩擦力, N

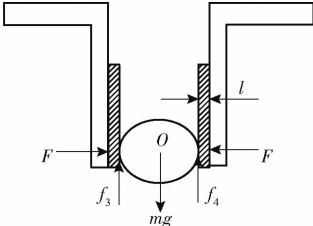


图 12 种薯夹持状态受力分析

Fig. 12 Mechanical analysis of seed potato clamping

由于切块过程需要以一定加速度运行至切刀处,为保证切块过程平稳进行以及种薯在切块瞬间不相对滑动、不掉落,需要设置更大的安全系数,取安全系数为 4,夹爪两侧各设计对中余量 3.5 mm,两侧设置柔性软垫宽度 l 为 6 mm,软垫内侧设有若干个凹凸块,用于增加种薯夹持表面的摩擦力,使得夹

爪内侧与种薯接触时能进行挤压固定,确保良好的夹持效果,手指气缸处于夹紧状态时两软垫距离范围为 38 ~ 63 mm,参照《亚德客气缸选型手册》,选用亚德客手指气缸型号为 HFD16 × 60,在工作气源气压为 0.4 MPa 时,可以产生最大夹持力为 75 N,经切块试验验证发现在切块过程中种薯能够保持相对稳定的状态,满足切分过程稳定夹持种薯要求。

3.3 切块机构设计

切块机构主要是将取料机构运送来的种薯进行切块处理。根据试验所测种薯三轴尺寸范围,依据种薯切块农艺要求,在保留芽眼基础上需对种薯进行切 3 块处理,切块机构结构如图 13 所示,机构由 2 个切分刀片、切刀安装底座以及安装调整块构成,且两切分刀片作为切块机构的核心构件,合理选择刀具几何参数可以减少切分过程切割阻力,使得切块过程更加平稳,以下对切块刀具及切块过程进行分析。

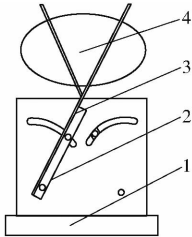


图 13 切刀机构结构图

Fig. 13 Structure diagram of cutting mechanism

1. 切刀安装底座 2. 切刀调整块 3. 切分刀片 4. 待切分种薯

相关研究表明,滑切过程与正切相比,滑切只需要相对较小的切削力就能完成切削过程,主要原因是滑切过程中具有更小的有效刀片切削角度^[19-21]。如图 14 所示,种薯以速度 V_Q 与刀具刀片发生接触,刀具刀片刃角角度为 γ ,滑动切削角度为 β ,在滑切过程中有效刀片切削角度 γ' 可表示为

$$\tan \gamma' = \frac{h_{EG}}{l_{GI}} = \frac{l_{HI} \tan \gamma}{l_{GI}} = \cos \beta \tan \gamma \quad (19)$$

其中

$$\begin{cases} \gamma' < \gamma \\ 0^\circ < \gamma < 90^\circ \end{cases} \quad (20)$$

式中 h_{EG} ——刀具切削刃高度,mm
 l_{GI} ——刀具切削刃长度,mm
 l_{HI} ——滑切过程有效刀片切削长度,mm

当种薯被刀片切削时,取料机构在伺服电机驱动下以一定切分速度实现对种薯切分,刀刃处会受到种薯块茎对其的切入阻力 F_f ,在实际切削过程中刀刃会对种薯产生一定的作用力,令其为 F_{Ni} ,在此力的作用下种薯切口处会发生一定量的形变,令此形变角为 θ_i ,对种薯切削时进行受力分析,如图 15 所示,当切削过程达到平衡状态时,结合胡克弹性定

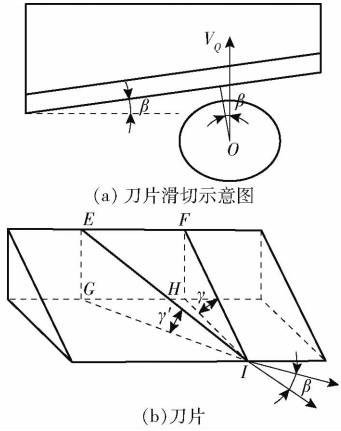


图 14 刀片滑切以及刀片示意图

Fig. 14 Blade slide cutting and blade schematic

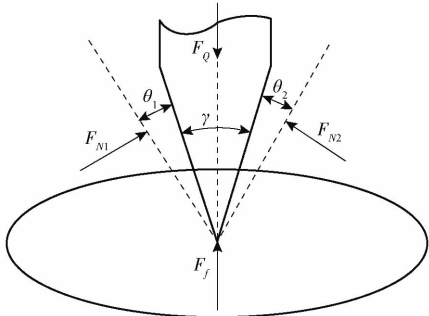


图 15 切削受力分析

Fig. 15 Mechanical analysis of cutting

理得关系式

$$\begin{cases} F_Q = F_f + \frac{F_{N1} \sin(0.5\gamma + \theta_1)}{\cos \theta_1} + \frac{F_{N2} \sin(0.5\gamma + \theta_2)}{\cos \theta_2} \\ F_{Ni} = k \Delta x_i \quad (i = 1, 2) \end{cases} \quad (21)$$

式中 F_Q ——种薯切块时所受切分作用力,N
 F_{Ni} ——第 i 个刃口处种薯对其的正压力,N
 k ——胡可定律中弹性系数,取 0.223
 Δx_i ——第 i 个刃口切面处薯块形变量,mm
当刃口处切面处种薯产生形变量 Δx 极小时,即 Δx 趋近于 0 时,根据数学中求极限原理有

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1 \quad (22)$$

联立式(19)、(21)、(22)可得

$$F_Q = F_f + \sum_{i=1}^2 \frac{k \sin \theta_i \sin(0.5 \arctan(\cos \beta \tan \gamma) + \theta_i)}{\cos \theta_i} \quad (23)$$

综合上述分析可知,有效刀片切削角度 γ' 随着滑动切削角度 β 的增大而减小,在刀具切削过程中,刀具的实际刃角为 γ ,但有效切削刃角却变成 γ' ,明显小于 γ ,则在滑动切块过程中单位切面上刀刃所受种薯切分阻力就越小,从而使得切块过程以更小的切割力进行切分,保证种薯切分作业过程平稳进行,参考《食品加工机械与设备》及

借鉴同类型果蔬切分刀具结构参数,设计刀具刃角为 16° ,滑切角为 18° ,刀片材质选用 9Cr18 不锈钢材质,刀片厚度为 1.2 mm,为实现种薯切 3 块处理,2 个刀片前后交错成一定角度,通过刀具调节机构调整 V 形刀具夹角,V 形刀具夹角会影响种薯切块尺寸,以 V 形刀具夹角为试验因素进行种薯切块效果单因素试验,结果表明在 V 形刀具夹角为 $45^{\circ} \sim 53^{\circ}$ 时薯块切块效果较好,切种盲眼率低、切种合格率高。

4 台架试验

4.1 试验条件

于 2023 年 5 月在山东思代尔农业装备有限公司研究生工作站实验基地开展试验,选用贮藏末期的荷兰 15 号种薯一级良种作为试验切块对象,分级处理后得到质量分布范围为 140 ~ 210 g 的种薯,经前期种薯物料特性研究,种薯形状呈类椭圆形,经测定该种薯长度主要分布范围为 70 ~ 95 mm,宽度主要分布范围为 50 ~ 70 mm,高度主要分布范围为 45 ~ 65 mm,平均含水率为 76.38%,该品种顶部以及尾部芽眼相对密集,侧芽较少。试验所用仪器设备包括:电子天平、干燥箱、游标卡尺等。

4.2 试验参数与评价指标

通过上述切块作业过程的力学分析和动力学分析,明晰了影响马铃薯种薯自动切块试验台性能的主要因素有圆台辊组中心距、链条输送速度、V 形刀具夹角,结合前期单因素试验确定影响各因素的取值范围:圆台辊组中心距 95 ~ 105 mm、链条输送速度 0.015 ~ 0.025 m/s 及 V 形刀具夹角 $45^{\circ} \sim 53^{\circ}$ 。通过调节变频器频率来控制驱动电机转速调节链条输送速度,通过安装在两侧链条板链不同位置调节圆台辊组中心距,通过切刀安装块以及切刀安装位置调节 V 形刀具夹角,搭建自制切块试验平台进行种薯切块性能试验。

目前我国还没有马铃薯种薯切块机具评价标准,本试验依据山东思代尔农业装备有限公司的企业相关标准,选取切种合格率和切种盲眼率为评价指标^[22]。切种合格率 Y_1 是指切分后含有 1 个及以上芽眼且质量符合标准薯块数量占总切分种薯薯块数量百分比,其中将质量范围在 35 ~ 70 g 薯块定义为质量符合标准。切种盲眼率 Y_2 是指无芽眼的薯块数量占切块总数量百分比。

4.3 试验设计与结果分析

4.3.1 试验方案与结果

在上述工作原理及分析基础上,以圆台辊组中心距、链条输送速度、V 形刀具夹角为试验因素,以

切种合格率和切种盲眼率为评价指标,进行 Box - Behnken 响应曲面试验,共进行 17 组试验。设计三因素三水平试验,因素编码如表 2 所示,试验方案及结果如表 3 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 2 试验因素编码
Tab.2 Coding of test factors

编码	因素		
	圆台辊组中心距/mm	链条输送速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	V 形刀具夹角/ ($^{\circ}$)
-1	95	0.015	45
0	100	0.020	49
1	105	0.025	53

表 3 试验方案与结果
Tab.3 Test plan and results

试验 序号	因素			评价指标	
	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	0	0	0	98.24	1.21
2	-1	-1	0	91.37	2.26
3	1	-1	0	89.21	2.11
4	0	1	-1	87.52	2.39
5	-1	0	-1	91.23	3.08
6	1	1	0	91.95	1.87
7	0	0	0	98.35	1.23
8	0	0	0	97.43	1.26
9	0	-1	1	91.17	2.11
10	0	1	1	90.12	2.46
11	0	0	0	97.43	1.17
12	1	0	-1	92.56	2.37
13	0	-1	-1	90.63	2.65
14	-1	1	0	87.53	2.72
15	-1	0	1	94.33	2.72
16	0	0	0	97.53	1.19
17	1	0	1	95.57	2.38

4.3.2 试验结果分析

采用 Design-Expert 12.0.3 软件对试验数据进行二次回归方程分析,并对试验数据进行线性拟合,得到切种合格率 Y_1 与切种盲眼率 Y_2 编码值线性回归方程,对各试验因素进行显著性检验和方差分析^[23-24],进一步明确影响切块性能的相关因素,方差分析结果如表 4 所示。

由表 4 可知,切种合格率 Y_1 和切种盲眼率 Y_2 的二次回归模型 P 值均小于 0.01,极显著;失拟项 P 值均大于 0.05,不显著,表明切种合格率和切种盲眼率二次回归模型均与实际相符合,模型合理,可以较好地对切种合格率 Y_1 和切种盲眼率 Y_2 试验结果进行预测。对试验结果进行二次回归拟合,剔除模型中不显著项得到切种合格率 Y_1 和切种盲眼率 Y_2 二次回归模型方程为

表 4 回归方程方差分析

Tab. 4 Regression equation analysis of variance						
试验 指标	方差 来源	平方和	自由度	均方	F	P
Y ₁	模型	219.68	9	24.41	54.63	<0.000 1***
	X ₁	2.92	1	2.92	6.53	0.037 8**
	X ₂	3.46	1	3.46	7.74	0.027 2**
	X ₃	10.70	1	10.70	23.94	0.001 8***
	X ₁ X ₂	10.82	1	10.82	24.22	0.001 7***
	X ₁ X ₃	0.002 0	1	0.002 0	0.004 5	0.948 2
	X ₂ X ₃	1.06	1	1.06	2.37	0.167 2
	X ₁ ²	18.73	1	18.73	41.92	0.000 3***
	X ₂ ²	135.45	1	135.45	303.13	<0.000 1***
	X ₃ ²	21.59	1	21.59	48.31	0.000 2***
	残差	3.13	7	0.45		
	失拟	2.29	3	0.76	3.62	0.123 2
	系统误差	0.84	4	0.21		
	总和	222.81	16			
Y ₂	模型	6.40	9	0.71	546.54	<0.000 1***
	X ₁	0.52	1	0.53	403.86	<0.000 1***
	X ₂	0.012	1	0.012	9.24	0.018 9**
	X ₃	0.084	1	0.084	64.62	<0.000 1***
	X ₁ X ₂	0.12	1	0.12	94.18	<0.000 1***
	X ₁ X ₃	0.034	1	0.034	26.31	0.001 4***
	X ₂ X ₃	0.093	1	0.093	71.52	<0.000 1***
	X ₁ ²	1.68	1	1.68	1 290.93	<0.000 1***
	X ₂ ²	0.66	1	0.66	508.91	<0.000 1***
	X ₃ ²	2.65	1	2.65	2 040.78	<0.000 1***
	残差	0.009 1	7	0.001 3		
	失拟	0.004 2	3	0.001 4	1.15	0.429 8
	系统误差	0.004 9	4	0.001 2		
	总和	6.41	16			

注：*** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)；** 表示差异显著 ($0.01 < P < 0.05$)。

$$Y_1 = 97.80 + 0.60X_1 - 0.65X_2 + 1.16X_3 - 1.64X_1X_2 - 2.11X_1^2 - 5.67X_2^2 - 2.26X_3^2 \quad (24)$$
$$Y_2 = 1.21 - 0.25X_1 + 0.03X_2 - 0.11X_3 - 0.17X_1X_2 + 0.09X_1X_3 + 0.15X_2X_3 + 0.63X_1^2 + 0.39X_2^2 + 0.79X_3^2 \quad (25)$$

由表 4 可知, X_3 、 X_1X_2 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 对切种合格率模型差异影响极显著, X_1 、 X_2 对切种合格率模型差异影响较显著, 其他因素影响不显著, 试验因素对切种合格率模型 Y_1 的影响主次顺序为 V 形刀具夹角、链条输送速度、圆台辊组中心距。切种盲眼率回归模型中, X_1 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 对模型差异影响极显著, X_2 对模型差异影响较显著, 对 Y_2 的影响主次顺序为圆台辊组中心距、V 形刀具夹角、链条输送速度。

4.3.3 模型交互作用分析

为了便于探究交互项对两试验指标影响规律, 对试验因素交互项显著项进行响应面分析。

图 16 为 V 形刀具夹角固定在中心水平时, 链条输送速度与圆台辊组中心距的交互作用对切种合格率 Y_1 的影响。当圆台辊组中心距一定时, 切种合格率随链条输送速度增加呈先升高后降低趋势, 当链条输送速度一定时, 切种合格率随辊组中心距增加呈先升高后降低趋势, 随着链条输送速度逐渐增大时, 种薯平均整列定位时间变短, 整列定位效果更佳, 但速度过快, 造成种薯输送运动不稳定, 造成种薯上下起伏运动, 同时种薯定向夹取过程更加困难。

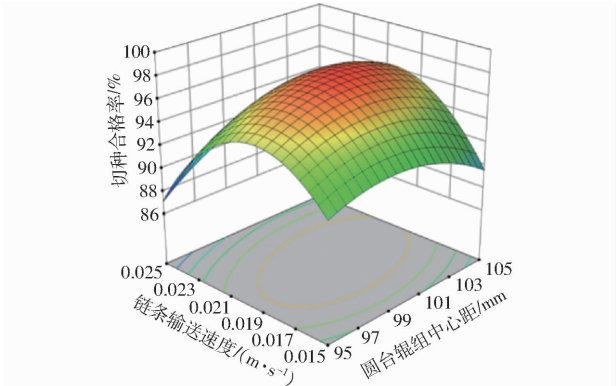


图 16 交互因素对切种合格率影响的响应曲面
Fig. 16 Response surface of interaction factors on seed potato cutting qualification rate

图 17 为各因素交互作用对切种盲眼率 Y_2 的影

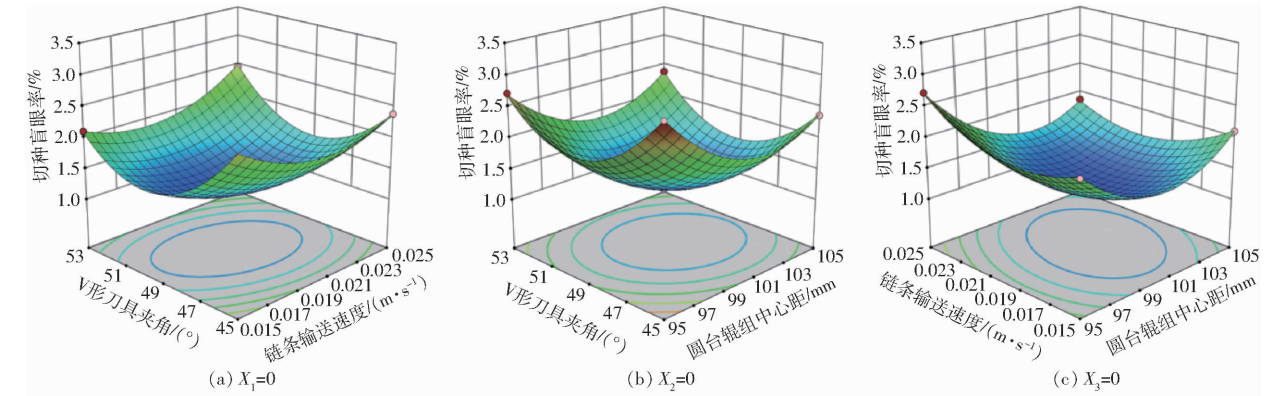


图 17 交互因素对切种盲眼率影响的响应曲面
Fig. 17 Response surfaces of interaction factors on blind rate of potato block

响。由图 17a 可知,切种盲眼率随链条输送速度增加呈先降低后升高趋势,随 V 形刀具夹角增加呈先降低后升高趋势。由图 17b 可知,切种盲眼率随 V 形刀具夹角增加呈先降低后升高趋势,随圆台辊组中心距增加呈现先降低后升高趋势。由图 17c 可知,切种盲眼率随圆台辊组中心距增加呈先降低后升高趋势,随链条输送速度增加呈先降低后升高趋势。由此可见在一定范围内,适当增加圆台辊组中心距和链条输送速度有助于降低薯块盲眼率。随着 V 形刀具夹角增加,中间段切分薯块质量逐渐增大,同时薯块含有芽眼概率增大,薯块盲眼率降低,但随着 V 形刀具夹角继续增加,两端切分薯块面积减少,导致两端切分薯块预留质量减小,切分后薯块合格率降低。

4.3.4 参数优化

为了得到切块装置最佳工作参数组合,基于上述回归模型的试验指标分析结果,建立目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (26)$$

为尽可能实现马铃薯种薯自动切块机较高切种合格率以及较低切种盲眼率的设计要求,运用软件 Design-Expert 12.0.3 中多目标参数优化模块对上述指标进行优化求解,得到最优参数组合^[25]:圆台辊组中心距为 100.83 mm、链条输送速度为 0.019 m/s、V 形刀具夹角为 49.50°,对应的切种合格率为 97.95%,切种盲眼率为 1.18%。

4.4 验证试验

为了验证上述各指标预测模型结果可靠性,对优化后参数微调,将圆台辊组中心距调整为链条节距整数倍,设定试验台参数:圆台辊组中心距为 101.60 mm、链条输送速度为 0.019 m/s、V 形刀具夹角为 49.50°,在此试验参数组合下进行 5 次重复试验,并对试验验证结果取平均值,试验过程以及切块效果如图 18 所示。试验结果:切种合格率为 97.56%,切种盲眼率为 1.27%,试验验证结果与优化结果基本一致,试验值与优化值相对误差均小于 5%,其相对误差较小,可以作为种薯切块装置的最佳工作参数,切后薯块平均长度为 38 mm,平均宽度

为 35 mm,平均厚度为 32 mm,切块形状均匀程度较好,薯块损伤程度很低,能为高速、精量播种机具提供较规范的播种薯块。



图 18 试验过程以及种薯切分效果
Fig. 18 Experimental process and effect of seed potato cutting

5 结论

- (1) 针对马铃薯种薯切块机切种质量差和自动化程度低等问题,设计了一种适用于当前农艺技术要求的马铃薯种薯自动切块装置。该装置通过整列定位机构实现种薯空间姿态调整定位,通过取料机构与切刀机构配合完成种薯均匀切分过程,提高了种薯切种合格率和自动化水平,减少了人力成本。
- (2) 通过对切块装置关键部件进行理论分析,明晰影响切块作业效果的主要因素及各因素的取值范围;通过 Box - Behnken 响应面组合试验,建立了影响因素与试验指标之间回归模型,通过方差分析得到切种合格率影响因素由大到小为 V 形刀具夹角、链条输送速度、圆台辊组中心距,切种盲眼率影响因素由大到小为圆台辊组中心距、V 形刀具夹角、链条输送速度。
- (3) 研制马铃薯种薯切块试验台架进行验证试验,在最优参数优化组合条件下进行试验,结果表明:当圆台辊组中心距为 101.60 mm、链条输送速度为 0.019 m/s、V 形刀具夹角为 49.50°时,切种合格率为 97.56%,切种盲眼率为 1.27%,试验结果与优化分析结果基本一致,该作业参数组合条件下种薯自动切块装置性能可以满足切种作业要求。

参 考 文 献

[1] 杨雅伦,郭燕枝,孙君茂. 我国马铃薯产业发展现状及未来展望[J]. 中国农业科技导报,2017,19(1):29-36.
YANG Yalun, GUO Yanzhi, SUN Junmao. Present status and future prospect for potato industry in China[J]. Journal of

- Agricultural Science and Technology, 2017,19(1):29–36. (in Chinese)
- [2] 李紫辉,温信宇,吕金庆,等. 马铃薯种植机械化关键技术及装备研究进展分析与展望[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 1–16.
- LI Zihui, WEN Xinyu, LÜ Jinqing, et al. Analysis and prospect of research progress on key technologies and equipments of mechanization of potato planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 1–16. (in Chinese)
- [3] 杨帅, 閔凡祥, 高云飞, 等. 新世纪中国马铃薯产业发展现状及存在问题[J]. 中国马铃薯, 2014, 28(5): 311–316.
- YANG Shuai, MIN Fanxiang, GAO Yunfei, et al. Current situation and problems of potato industry development in China in the new century[J]. China Potato, 2014, 28(5): 311–316. (in Chinese)
- [4] 卓会敏, 付三泽, 刘恒, 等. 我国马铃薯产业标准现状分析及建议[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(21): 248–250, 270.
- ZHUO Huimin, FU Sanze, LIU Heng, et al. Analysis and suggestions on current situation of potato industry standards in China [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(21): 248–250, 270. (in Chinese)
- [5] 徐端平. 浅析北方区马铃薯机械化种植农艺措施[J]. 农业与技术, 2019, 39(16): 112–114.
- XU Duanping. Analysis on agronomic measures of mechanized potato planting in northern China[J]. Journal of Agriculture and Technology, 2019, 39(16): 112–114. (in Chinese)
- [6] SEKHON H S, SINGH M. Effect of mechanical and chemical seed treatments on the number and size of seed tubers and yield of potatoes[J]. The Journal of Agricultural Science, 1984, 103(3): 487–495.
- [7] All Star Manufacturing & Design[EB/OL]. <http://www.allstarmfgllc.com>.
- [8] 吕金庆, 杨晓涵, 温信宇. 马铃薯切种机械的研究现状与发展趋势[C]//马铃薯产业与美丽乡村, 2020: 465–469.
- [9] Dewulf[EB/OL]. <https://www.dewulfgroup.com>.
- [10] 周树林. 舀勺定刀式马铃薯种薯切块机: 201510180121.3[P]. 2015–07–22.
- [11] 张国强. 马铃薯种薯自动切块机的研究与设计[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2015.
- ZHANG Guoqiang. The study and design of the potato seed auto-cutting machine[D]. Huhhot: Inner Mongolia University, 2015. (in Chinese)
- [12] 冯伟, 李平, 张先锋, 等. 马铃薯种薯智能切块机设计与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(12): 124–129, 134.
- FENG Wei, LI Ping, ZHANG Xianfeng, et al. Design and experiment of intelligent potato cutting machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(12): 124–129, 134. (in Chinese)
- [13] 吕金庆, 张航, 李季成, 等. 马铃薯种薯切块机整列装置设计与试验[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(11): 47–59.
- LÜ Jinqing, ZHANG Hang, LI Jicheng, et al. Design and experiment of sorting device of potato seed cutting machine[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022, 53(11): 47–59. (in Chinese)
- [14] HAN X, REN L, SHANG Z, et al. Development of a full-view-type grading cup for automated sweet cherry sorters[J]. Agronomy, 2023, 13(2): 500.
- [15] GUANJUN B, MIMI J, YI X, et al. Cracked egg recognition based on machine vision[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 158: 159–166.
- [16] XU B, CUI X, JI W, et al. Apple grading method design and implementation for automatic grader based on improved YOLOv5 [J]. Agriculture, 2023, 13(1): 124.
- [17] WROBEL S, WASIK A. Seed potato production in poland[J]. American Journal of Potato Research, 2014, 91(3): 112–114.
- [18] 廖庆喜, 王洋, 胡乔磊, 等. 油菜基质块苗移栽机取苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 93–102.
- LIAO Qingxi, WANG Yang, HU Qiaolei, et al. Design and experiment on pick-up device for rapeseed substrate seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 93–102. (in Chinese)
- [19] 屈哲, 来杭生, 崔涛, 等. 整瓶马铃薯组培苗剪切机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 39–46.
- QU Zhe, LAI Hangsheng, CUI Tao, et al. Design and experiment of shear mechanism for whole bottle potato tissue culture seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 39–46. (in Chinese)
- [20] PAN S. On the theory of sliding cutting and the choice of its angle[J]. Huazhong Agric. Coll, 1982, 6: 64–69.
- [21] XUN H. Research of the theory of sliding cutting[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Mach., 1979, 10: 107–111.
- [22] 王相友, 祝珊, 李学强, 等. 定向排列纵横切分马铃薯种薯切块机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 334–345.
- WANG Xiangyou, ZHU Shan, LI Xueqiang, et al. Design and experiment of directional arrangement vertical and horizontal cutting of seed potato cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 334–345. (in Chinese)
- [23] 葛宜元. 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, 2014: 155–164.
- [24] 王相友, 任加意, 吕丹阳, 等. 马铃薯定量装袋装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 156–166.
- WANG Xiangyou, REN Jiayi, LÜ Danyang, et al. Design and test of potato constant weight bagging device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 156–166. (in Chinese)
- [25] 吕金庆, 刘金妮, 赵治明, 等. 马铃薯碎土整地联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 19–29.
- LÜ Jinqing, LIU Jinni, ZHAO Zhiming, et al. Design and test of key components of potato soil-crushing site preparation machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 19–29. (in Chinese)