doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.018

小型辊组式马铃薯种薯分级切块机设计与试验

张万枝[1,2]　黄彬恒[1]　王瑞敏[3]　孙雨露[1]　王旭阳[1]　刘树峰[4]

(1.山东农业大学机械与电子工程学院,泰安 271018;2.农业装备智能化山东省工程研究中心,泰安 271018;
3.山东农业大学信息科学与工程学院,泰安 271018;4.海南大学机电工程学院,海口 570228)

摘要:针对我国现有马铃薯种薯切块机整机庞大且切块质量不高等问题,设计了一种多功能小型辊组式马铃薯种薯分级切块机。对整机及关键部件进行结构设计,通过理论分析和数值计算确定影响分级效果的主要因素为辊组倾斜角、第 1 排辊组转速和上料量,确定影响切块效果的主要因素为夹持辊竖直方向中心距、夹持辊中心线与水平方向夹角和夹持辊转速。基于 EDEM-RecurDyn 耦合仿真确定第 1 排辊组转速和上料量取值范围;以辊组倾斜角、第 1 排辊组转速和上料量为试验因素,以分级效率和分级精度为评价指标,采用 Box-Behnken 试验设计方法,确定上料分级装置最优参数组合为:辊组倾斜角 10.53°、第 1 排辊组转速 88.7 r/min、上料量 52.22 kg/min,此时分级精度为 92.65%、分级效率为 52.04 kg/min。样机试验结果表明,最优参数组合下,分级精度为 91.67%,分级效率为 49.44 kg/min,切块合格率为 95.75%,切块效率为 48.24 kg/min,薯块均匀性好,满足种薯切块农艺要求。

关键词:马铃薯;种薯分级;切块机;辊组式;耦合仿真;样机试验

中图分类号:S226　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)04-0180-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Small Roller Type Seed Potato Grading and Cutting Machine

ZHANG Wanzhi[1,2]　HUANG Binheng[1]　WANG Ruimin[3]　SUN Yulu[1]　WANG Xuyang[1]　LIU Shufeng[4]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Taian* 271018, *China*
2. *Shandong Engineering Research Center of Agricultural Equipment Intelligentization*, *Taian* 271018, *China*
3. *School of Information Science and Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Taian* 271018, *China*
4. *School of Mechanical and Electrical Engineering*, *Hainan University*, *Haikou* 570228, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of large machine and low cutting quality of potato seed potato cutting machine in China, a multi-functional small roller type potato seed potato grading and cutting machine was designed. The structural design of the whole machine and key components was carried out. Through theoretical analysis and numerical calculation, the main factors affecting the grading effect were determined to be the inclination angle of the roller group, the speed of the first row of roller group and the feeding amount. The main factors affecting the cutting effect were determined to be the vertical center distance of the clamping roller, the angle between the center line of the clamping roller and the horizontal direction and the speed of the clamping roller. Based on EDEM - RecurDyn coupling simulation and theoretical analysis, the range of rotation speed and feeding amount of a row of rollers was determined. The inclination angle, the rotation speed and feeding amount of rollers were taken as experimental factors, and the classification efficiency and classification accuracy were taken as evaluation indexes., Box-Behnken experimental design method was used to determine the optimal parameter combination of the feeding grading device. The inclination angle of the roller group was 10.53°, the rotation speed of the first row of roller groups was 88.7 r/min, and the feeding amount was 52.22 kg/min. At this time, the grading accuracy was 92.65%, and the grading efficiency was 52.04 kg/min. The prototype test showed that under the optimal parameter combination, the grading accuracy was 91.67%, the grading efficiency was 49.44 kg/min, the qualified rate of the cutting block was 95.75%, the cutting efficiency was

收稿日期:2024-10-25　修回日期:2024-12-02

基金项目:山东省薯类产业技术体系农业机械岗位专家项目(SDAIT-16-10)和山东省农业重大技术协同推广计划项目(SDNYXTTG-2025-22)

作者简介:张万枝(1986—),男,副教授,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail:zhangwanzhi@163.com

通信作者:刘树峰(1990—),男,高级实验师,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail:liusf@sdau.edu.cn

48.24 kg/min, and the uniformity of the potato block was good, which met the agronomic requirements of the seed potato cutting block.

Key words: potato; seed potato grading; cutting device; roller assembly; coupling simulation; prototype test

0　引言

马铃薯是我国第四大主粮作物，种植面积和产量均位于世界第一[1]。马铃薯属于块茎繁殖作物，种薯切块是马铃薯种植中的首要工序，其切块质量是影响马铃薯产量的重要因素之一。切块太大，种薯用量多、成本高；切块太小，薯块在播种后易出现干缩，出苗率低。目前我国马铃薯多分散精细化种植，种薯切块方式以人工为主，劳动强度非常大。因此研制适宜我国马铃薯产业发展且切块质量高的种薯切块机对实现我国马铃薯全程机械化生产具有重要意义。

国外马铃薯种薯切块机研究起步较早，且以大型集成化机械为主，如美国 Milestone 公司研发的 60－D 型切块机，切块效率高，但整机体积庞大，结构较为复杂；德国 Grimme 公司研发了一种多功能一体化的大型分级切块机，整机价格昂贵，并不适于我国马铃薯种植国情[2]。近年来随着国内劳动力结构性矛盾加剧，国内相关学者通过借鉴国外相关技术，在种薯机械化切块技术研究方面取得了一定进展。如吕金庆等[3]设计了一种纵横刀组协同式马铃薯切块装置，可完成种薯的一次纵向与二次横向切割；王相友等[4]设计了一种整列定位夹切组合式切块装置，通过 PLC 程序配合多种传感器输出信号控制夹持取料机构对种薯进行抓取并加速通过 V 形刀，可实现种薯精准切分；单信和等[5]设计了一种四爪夹持式马铃薯种薯夹持装置，能够固定种薯在输送与切块过程中的姿态，对种薯实现 2 次对半切割；冯伟等[6]基于马铃薯分级机设计了一种舀勺式种薯智能切块机，可将种薯切分成 2～4 块；徐子原等[7]基于 EDEM－RecurDyn 耦合方法对切块机取种装置作业参数进行优化，以提高切块质量；文献[8－10]基于深度学习算法在芽眼检测基础上研究种薯智能化切块，设计了多种自动切块装置，但符合切块农艺要求的切刀控制决策仍处于实验室研究阶段，尚不能满足实际需求。

目前我国马铃薯种薯切块机普遍借鉴国外相关技术，存在整机庞大、价格昂贵、切块质量不高等问题，不适宜我国马铃薯产业发展。为此，基于我国马铃薯多分散精细化种植情况，本文设计一款集上料、分级、切块、拌种等多功能为一体的小型辊组式马铃薯种薯分级切块机，并对其作业性能进行仿真分析和样机试验，旨在促进马铃薯种薯分级切块在满足农艺要求的基础上提高切块合格率和切块效率，为马铃薯种薯分级切块机理论研究和创新设计提供技术支持。

1　种薯切块农艺与物料特性

1.1　种薯切块农艺

马铃薯种薯制备主要包括分级、切块、消毒等流程。质量小于 70 g 种薯无需切分直接播种；质量 70～140 g 种薯，纵向一字刀切分成 2 块；质量 140～280 g 种薯十字刀切分成 4 块。切好的薯块质量一般为 35～70 g，并且包含 1 个以上健康芽眼。薯块采用药剂拌种，以促进薯块伤口愈合，防止薯块在土壤中腐烂，提高出苗率。

1.2　种薯物料特性

鉴于马铃薯种植所用薯块多由中小型种薯制备，选取符合要求的荷兰系列种薯品种，测量其三轴尺寸，如表 1 所示。依据 GB/T 6242—2006《种植机械 马铃薯种植机 试验方法》中种薯形状指数计算公式，确定种薯形状指数为 119.7～322.9，平均值为 217.86，多数呈椭圆形。不同质量范围的种薯三轴尺寸及形状指数测定可为后续分级切块机关键部件设计提供数据支撑。

表 1　种薯三轴尺寸

Tab.1　Geometric size parameters of seed potatoes

质量/g	长度/mm	宽度/mm	高度/mm
0～70	45～72	33～48	32～46
70～140	55～88	36～69	36～58
>140	68～97	50～71	45～65

2　整机总体设计

2.1　整机结构

小型辊组式马铃薯种薯分级切块机主要包括上料装置、分级输送装置、夹持切块装置、拌种装置及传动系统等。整机结构如图 1 所示，整机上方为料斗及上料装置，种薯经上料装置运送到分级辊组，经分级辊组定位筛选后被下方的定向输送链纵向运送到夹持切块装置，以上各装置由传动系统电机Ⅰ驱动；拌种装置位于夹持切块装置上方，由传动系统电机Ⅱ驱动。

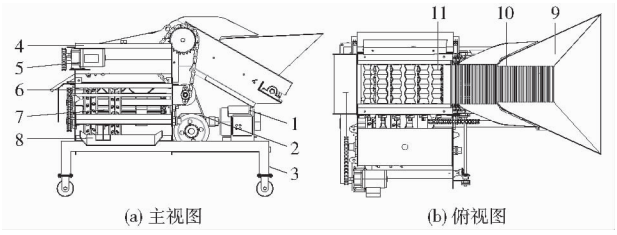


图 1 整机结构图

Fig. 1 Structural views of whole machine

1. 电机Ⅰ 2. 减速器 3. 机架 4. 拌种装置 5. 电机Ⅱ 6. 夹持切块装置 7. 定向输送链 8. 出料口 9. 料斗 10. 上料装置 11. 分级辊组

2.2 工作原理

料斗内种薯在上料装置杆条升运链带动下缓慢上升至顶部,经导流板滚落进分级辊组;分级辊组以不同间隙排列,可进行 3 种不同等级种薯筛分,并对种薯进行空间姿态调整,使得种薯长轴与辊组平行,有利于下一步切块工作;种薯经分级辊组筛分后掉落至下方的定向输送链,将无需切块种薯直接送至出口处,其余送至夹持切块装置;夹持切块装置上下夹持辊夹持种薯经一字刀或十字刀将种薯纵向切分成 2 块或 4 块,切分后薯块经拌种装置拌种后掉落至出口处。

2.3 动力传递路线

电机Ⅰ通过轴传动将动力传递给减速器实现增扭,减速器经过一级带传动增速,一路通过一级链传动减速,分别驱动上料装置杆条升运链转动和分级辊组自转,完成种薯上料和定位筛分。另一路通过锥齿轮改变传动方向,后经一级链传动减速驱动定向输送链以及上下夹持辊转动,完成种薯定向输送及切块作业。电机Ⅱ通过链传动驱动拌种装置,完成薯块拌种工作。动力传递路线如图 2 所示,图中 i 表示传动比。

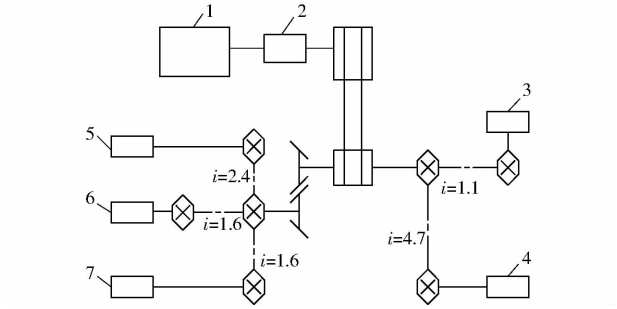


图 2 动力传递路线简图

Fig. 2 Schematic of power transmission route

1. 电机Ⅰ 2. 减速器 3. 分级辊组 4. 上料装置 5. 定向输送链 6. 上夹持辊 7. 下夹持辊

2.4 技术参数

小型辊组式马铃薯种薯分级切块机主要技术参数如表 2 所示。

表 2 主要技术参数

Tab. 2 Main technical parameters

参数	数值
切块效率/(kg·min^{-1})	48.24
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 900×1 150×1 340
杆条升运链有效长度/mm	756
定向输送链条有效长度/mm	490
分级辊组有效长度/mm	630
适合种薯切块质量/g	≤280

3 关键部件设计

3.1 上料装置

上料装置结构如图 3 所示,主要包括主从动齿轮、主从动轴、杆条升运链、导流板等。上料装置左右两侧安装挡板可有效防止种薯在升运过程掉落;末端安装缓冲导流板,可降低种薯滚落速度,防止种薯与分级辊组产生较大冲击。

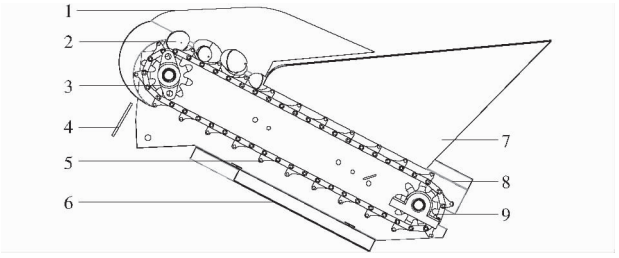


图 3 上料装置结构图

Fig. 3 Structural diagram of feeding device

1. 挡板 2. 种薯 3. 主动齿轮 4. 导流板 5. 升运链 6. 底板 7. 料斗 8. 机架 9. 从动齿轮

上料装置核心部件为杆条升运链,升运链选用滚子链,每 3 根杆条为一组固定在连接板上,连接板下方 2 根杆条与滚子链固定连接,升运链在主动齿轮驱动下逆时针转动。每 2 个升运链单元之间形成三维空间,作业时,种薯在三维空间内随升运链上升,保证种薯向上平稳运送同时可去除部分杂物。考虑到种薯短轴平均尺寸约为 53 mm、长轴平均尺寸约为 76 mm,参考其它杆条升运链结构[11-12],选用杆条尺寸为长 307 mm、直径 10 mm、杆条间距 60 mm。

3.2 分级输送装置

分级输送装置结构如图 4 所示,主要包括分级辊组和定向输送链条,分级辊组调整种薯姿态以及筛分不同尺寸种薯,种薯在分选槽导向下沿自身长轴方向由定向输送链条输送至出料口或夹持切块装置。

3.2.1 结构设计

分级辊组是分级输送装置的核心部件,直接影响种薯分级效率和分级精度。参考其它分级装置辊

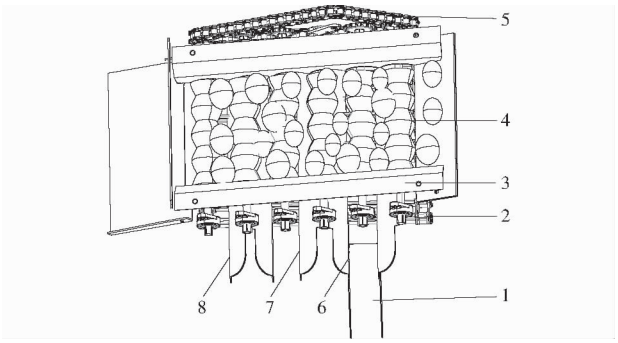
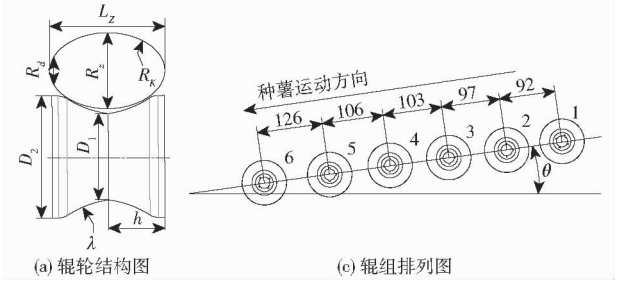


图 4　分级输送装置结构图

Fig. 4　Structural diagram of positioning grading device

1. 出料口　2. 定向输送链　3. 隔板　4. 分级辊组　5. 传动链
6. 第 1 分选槽　7. 第 2 分选槽　8. 第 3 分选槽

轮结构及运动方式[13-14]，为契合种薯外表面形状，设计分级辊组辊轮形状为圆台体，侧面为一定弧度的凹面；2 个辊轮为一组，上底面连接，相邻 2 个辊轮之间形成近似椭圆形空间，有利于种薯筛分和位置调整，防止种薯横向干扰。根据所测荷兰系列种薯长度最大值 L_Z 为 97 mm，结合种薯形状指数范围（119.7 ~ 322.9），种薯长轴平均曲率半径 R_K 为 172 mm，设计辊轮高近似为辊轮长度最大值的 1/2，考虑加工及安装精度，取辊轮高 h 为 45 mm，侧面弧度 λ 为 24°；为提高分级装置对相近尺寸种薯的适应性，防止辊轮直径过小造成前后排种薯干扰或辊轮直径过大增大机组结构体积，参考同类型辊轮直径设计，根据种薯短轴平均尺寸 R_z 约为 53 mm，种薯端点处直径平均值 R_d 约为 27 mm，设计上底面直径 D_1 为 54 mm，下底面直径 D_2 为 80 mm。辊轮中心材料采用合金，外部包裹硬度较大的海绵，既可以缓冲种薯从上料装置滚落至分级辊组时发生碰撞，又可以增大种薯与辊轮表面摩擦因数。辊轮结构如图 5a 所示。



(a) 辊轮结构图　　(c) 辊组排列图

图 5　分级辊组

Fig. 5　Grading roller

为实现筛分大、中、小 3 级种薯，综合考虑电机Ⅰ输出功率和从动齿轮布局等因素，共设计 6 排辊组，辊组排布及种薯运动方向如图 5b 所示。考虑到辊轮高度及上料装置宽度，设计每排辊组包含 8 个辊轮，辊轮并排安装在一根辊轴上，为确保种薯能够在辊组间隙中完成姿态调整，设计连接各辊组链轮直径逐渐减小，相应每级辊组转速逐渐变快。为使种薯更易从当前辊组间隙翻滚至下一辊组间隙，提高分级效率，设计 6 排辊组与水平面成夹角 θ（辊组倾斜角）排布。种薯从辊组间隙掉落或翻滚至下一辊组间隙均与辊组中心距有关。辊组中心距越大，种薯翻滚至下一辊组间隙越困难，降低分级精度；辊组中心距越小，种薯越不易被筛分，影响分级效果。1、2、3 排，3、4、5 排和 5、6 排辊组间隙分别筛分 1、2、3 级种薯，根据 1 级种薯短轴平均尺寸范围（32 ~ 41 mm）、2 级种薯短轴平均尺寸范围（48 ~ 50 mm）、3 级种薯短轴平均尺寸（约大于 63 mm），结合辊轮上底面直径为 54 mm，尺寸参数选取保留一定设计余量，设计 1、2、3 排间辊组中心距分别为 92 mm 和 97 mm，3、4、5 排间辊组中心距分别为 103 mm 和 106 mm，5、6 排间辊组中心距为 126 mm。

3.2.2　辊组倾斜角设计

种薯进入分级辊组后，或直接从辊组间隙掉落；或在辊轮摩擦力作用下先自转，使得种薯长轴与辊组平行，随后翻滚至下一辊组间隙掉落。简化种薯短轴截面为一近似圆形，种薯位于辊组间隙时，二者接触处截面受力如图 6 所示。

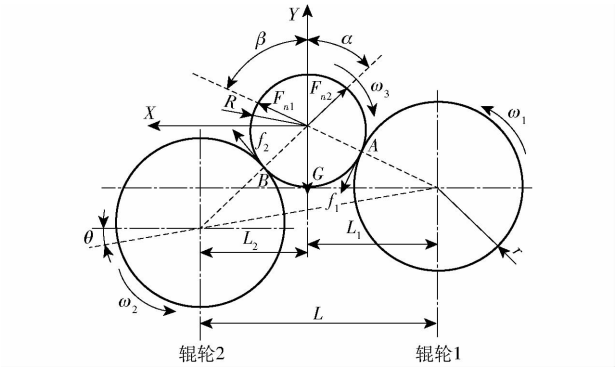


图 6　种薯在辊轮间隙受力分析

Fig. 6　Force analysis of seed potatoes in roller clearance

图 6 中，以种薯重心为原点，水平方向为 X 轴，竖直方向为 Y 轴。种薯在当前辊组间隙继续翻滚至下一辊组间隙，应满足点 B 逆时针转矩大于零，即

$$\sum M_B = F_{n1}R\sin(\alpha+\beta) + f_1 R\sin\left(\frac{\pi}{2}-\alpha-\beta\right) - GR\sin\alpha - f_1 R > 0 \tag{1}$$

式中　M_B——种薯在点 B 所受转矩，N·m

F_{n1}——辊轮 1 对种薯支持力，N

R——种薯等效旋转半径，mm

α——辊轮 2 对种薯支持力 F_{n2} 与竖直方向夹角，(°)

β——支持力 F_{n1} 与竖直方向夹角，(°)

f_1——辊轮 1 对种薯摩擦力，N

G——种薯所受重力,N

同时还应满足接触点 B 切线方向上合力大于零,即

$$\sum F_B = f_2 + F_{n1}\sin(\alpha+\beta) - G\sin\alpha + f_1\sin\left(\frac{\pi}{2}-\alpha-\beta\right) > 0 \tag{2}$$

式中 F_B——点 B 切线方向上合力,N

f_2——辊轮 2 对种薯摩擦力,N

摩擦力与支持力间关系式为

$$f = \mu F \tag{3}$$

式中 μ——种薯与辊轮的动摩擦因数

f——种薯受到辊轮的摩擦力,N

F——种薯受到辊轮的支持力,N

将式(3)代入式(1)、(2)化简可得

$$\begin{cases} F_{n1}\sin(\alpha+\beta) + \mu F_{n1}\cos(\alpha+\beta) - \mu F_{n1} > G\sin\alpha \\ \mu F_{n2} + F_{n1}\sin(\alpha+\beta) + \mu F_{n1}\cos(\alpha+\beta) > G\sin\alpha \end{cases} \tag{4}$$

当种薯满足式(4)时具备翻滚过辊轮的能力。但当种薯上料量比较大时,种薯之间可能会发生干涉,未及时被筛分的种薯可能会使后续种薯发生回滚现象,影响种薯分级。因此,为保证种薯从相应排辊组间隙及时掉落,种薯在 Y 轴方向所受向下的力应大于零,即

$$\sum F_y = G + \mu F_{n1}\sin\beta - \mu F_{n2}\sin\alpha - F_{n1}\cos\beta - F_{n2}\cos\alpha > 0 \tag{5}$$

式中 F_y——种薯在 Y 轴负方向所受合力,N

根据余弦定理可得

$$\cos(\alpha+\beta) = 1 - \frac{L^2}{2(r+R)\cos^2\theta} \tag{6}$$

式中 L——辊轮 1 与辊轮 2 间水平中心距,mm

r——种薯接触点辊轮半径,mm

根据式(4)~(6)可知,当种薯尺寸和辊轮半径一定时,种薯受辊轮支持力与竖直方向夹角 α、β 和辊组中心距及辊组倾斜角 θ 有关。当 θ 较大时,种薯在接触点 B 所受切向力较大,种薯在辊组间隙既不易被筛分也很难调整姿态;当 θ 较小时,种薯在点 B 所受合转矩较小,种薯难以翻滚至下一辊组间隙。显然,种薯等效旋转半径越大越易翻滚过辊轮[15-17],根据种薯是否翻滚过辊轮,分别取短轴平均尺寸 R 为 38.84、53.31 mm,结合前述辊轮尺寸及各排辊组中心距范围,设计辊组倾斜角 θ 为 5°~15°。种薯在辊组间隙中与后续种薯接触,会使种薯所受的支持力与摩擦力增大,促使种薯离开辊组间隙。因此,上料量也是影响种薯受力和分级作业效果的关键因素,后续通过仿真试验确定其取值范围。

3.2.3 辊轮转速分析

在种薯与辊轮接触过程中,若辊轮转速过快,则有可能损伤种薯表面甚至抛起种薯;若辊轮转速过慢则无法调整种薯姿态,影响分级效率[18]。分析种薯从当前辊组间隙运动至下一辊组间隙过程,如图 7 所示。首先,刚到达辊组间隙的种薯在两侧辊轮摩擦力矩作用下,绕自身长轴既滚动又滑动,直至自身线速度与辊轮 1 相同;随后由于辊轮 2 转速大于辊轮 1,种薯在辊轮 2 作用下向前翻滚,种薯在翻滚过辊轮 2 过程中,自身线速度与辊轮 2 线速度逐渐接近直至相等。种薯离开辊轮 1,翻滚过辊轮 2 至下一辊组间隙的过程轨迹如图 7 所示。

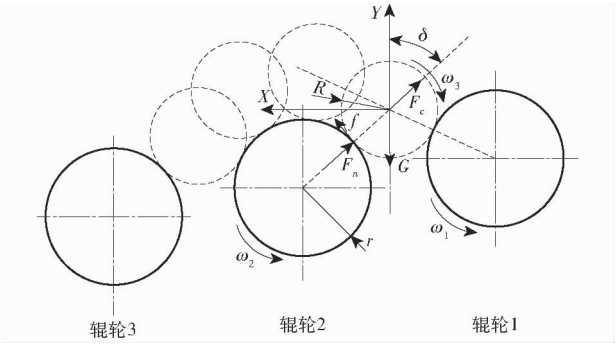


图 7 种薯翻滚辊轮过程

Fig. 7 Process of seed potatoes tumbling over rollers

图 7 中,以种薯初始位置重心为原点,水平方向为 X 轴,竖直方向为 Y 轴。种薯在翻滚过程中在 X 轴与 Y 轴方向上受力为

$$\begin{cases} F_x = -(F_n + F_c)\sin\delta + f\cos\delta \\ F_y' = (F_n + F_c)\cos\delta + f\sin\delta - G \end{cases} \tag{7}$$

式中 F_x——种薯在 X 轴方向上所受合力,N

F_y'——种薯在 Y 轴方向上所受合力,N

F_n——种薯所受辊轮支持力,N

F_c——种薯所受离心力,N

δ——种薯和辊轮 2 中心线与竖直方向夹角,(°)

种薯绕长轴的运动方程为

$$\begin{cases} \omega_2 = \omega_3 + \alpha_1 t \\ \Delta\theta = \omega_3 t + \frac{1}{2}\alpha_1 t^2 \\ \omega_3 R = \omega_1 r \end{cases} \tag{8}$$

式中 ω_1——辊轮 1 角速度,rad/s

ω_2——辊轮 2 角速度,rad/s

ω_3——种薯角速度,rad/s

$\Delta\theta$——种薯角位移,rad

t——种薯运动时间,s

α_1——种薯角加速度,rad/s^2

根据线速度与角速度的关系求导可得,种薯线

加速度与角加速度满足关系式

$$a = \alpha_1 r \tag{9}$$

式中　a——种薯线加速度，m/s^2

根据力学方程求得种薯线加速度，将式(9)代入方程(8)得到种薯线速度由 $\omega_1 R$ 变成 $\omega_2 r$ 所需时间及角位移分别为

$$t = \frac{mR}{f - G\sin\delta} \tag{10}$$

$$\Delta\theta = \frac{m(\omega_2 R - \omega_1 r)(2\omega_1 r + \omega_2 R^2 + \omega_1 rR)}{2R(f - G\sin\delta)} \tag{11}$$

式中　m——种薯质量，g

同时，为防止种薯在翻滚辊轮过程发生抛起，还需满足

$$G\cos\delta \geqslant m\omega_3^2(r + R) \tag{12}$$

将式(8)中的种薯角速度与辊轮角速度关系代入式(12)可得

$$\omega_1 \leqslant \frac{R}{r}\sqrt{\frac{g\cos\delta}{r + R}} \tag{13}$$

由式(10)、(11)可知，种薯在翻滚过程中趋于稳定主要影响因素有夹角 δ、角速度 ω_1 和 ω_2。其中 δ 与辊轮及种薯尺寸有关，根据辊轮结构尺寸及种薯物料特性测量得 δ 为 39.55°～43.76°。与以上理论分析相似，后排辊组转速也是影响种薯分级效率及分级稳定性的关键因素，而后排辊组转速均与前排辊组转速有关。由式(13)计算可得，若要使种薯在翻滚过程中不脱离辊轮作用，第 1 排辊组转速 n_1 应不大于 97 r/min。

3.3　夹持切块装置

夹持切块装置结构如图 8 所示，主要由夹持辊、一字切刀及十字切刀等部件组成。夹持辊辊轴通过轴承座固定在机架上，切刀安装在上、下夹持辊间隙下方。作业时，上、下夹持辊相向转动，定向输送链将分级后的种薯在分选槽引导下进入一字切刀夹持辊或十字切刀夹持辊间隙，在夹持辊推动下，种薯由一字切刀或十字切刀纵向切分成 2 块或 4 块后，从出料口掉落；无需切块种薯直接送至出料口处。参考其它同类型夹持切块机构[19]，切刀材质选用具有高耐磨、高耐腐蚀性的 9Cr18 不锈钢。

3.3.1　夹持辊设计

夹持辊是夹持切块装置的核心部件。种薯从定向输送链掉落至夹持辊间隙，为避免碰撞对种薯的损伤，夹持辊整体材料采用橡胶制成，中心通过法兰盘与辊轴固定，每个夹持辊纵截面为 2 个上底相对的梯形，夹持辊中心线与水平方向呈一定夹角，综合考虑整机高度和宽度、上下夹持辊材料特性和定向输送链安装位置，结合 2、3 级种薯宽高比约为

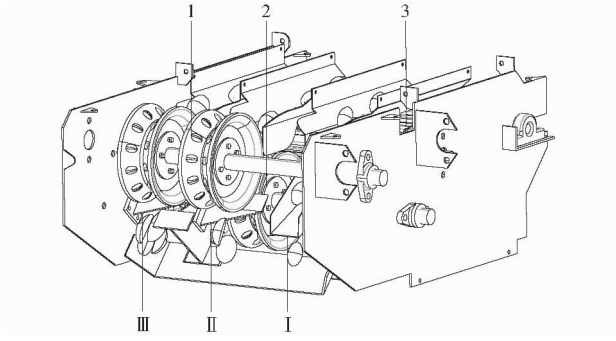


图 8　夹持切块装置结构图

Fig. 8　Structural diagram of clamping and cutting device

1. 上夹持辊　2. 下夹持辊　3. 定向输送链　Ⅰ. 无需切块　Ⅱ. 一字刀切块　Ⅲ. 十字刀切块

1.13，设计夹持辊内部直径 d_1 为 175 mm，外环直径 d_2 为 250 mm，锥度 λ_1 为 45°。夹持辊中间形成的空间能够更好地契合种薯轮廓，防止对种薯过度挤压造成损伤，其结构如图 9 所示。夹持辊与种薯接触表面上均匀分布凸起，以增大切块时夹持辊对种薯的摩擦力，夹持辊相对于切刀平面对称安装，以保证薯块均匀度。

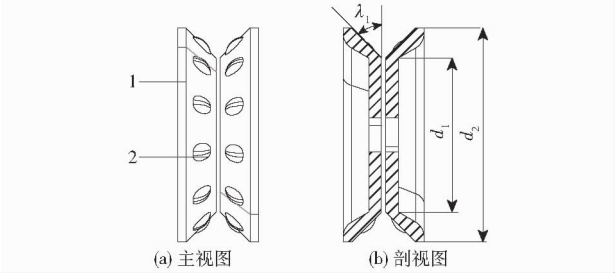


图 9　夹持辊结构简图

Fig. 9　Schematic of clamping roller structure

1. 橡胶　2. 凸起

3.3.2　种薯切块受力分析

种薯沿自身长轴方向在夹持辊夹持下被切刀纵切，将种薯长轴截面简化为椭圆形，以一字刀为例分析种薯切块时的受力。以夹持辊中心线为 X 轴、垂直方向为 Y 轴建立坐标系，种薯切块时受力如图 10 所示。

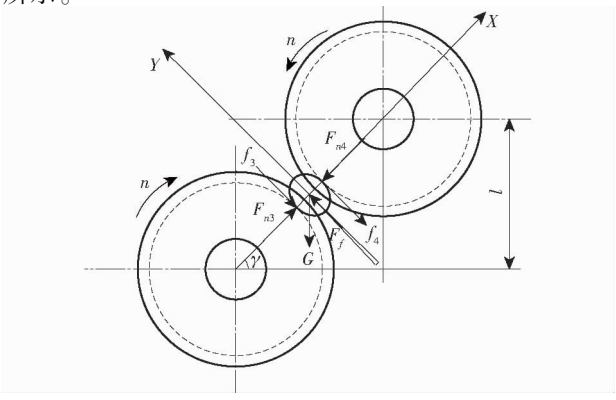


图 10　种薯切块时受力

Fig. 10　Force during cutting of seed potatoes

种薯所受支持力是由夹持辊与种薯间的弹性变形产生,可表示为

$$F_{ni} = A_J \varepsilon E \tag{14}$$

式中 F_{ni}——种薯所受夹持辊支持力,N

A_J——种薯与夹持辊接触面积,mm^2

ε——橡胶线应变,mm

E——橡胶弹性模量,取 7.8 MPa

种薯所受夹持辊摩擦力与支持力关系为

$$f_i = \mu' F_{ni} \tag{15}$$

式中 μ'——种薯与橡胶摩擦因数

f_i——种薯所受夹持辊摩擦力,N

种薯若要被切刀完整切分,则需在种薯 Y 轴负方向上合力大于零,根据条件可得

$$f_3 + f_4 + G\cos\gamma - F_f > 0 \tag{16}$$

式中 f_3——种薯所受下夹持辊摩擦力,N

f_4——种薯所受上夹持辊摩擦力,N

γ——夹持辊中心线与水平方向夹角,(°)

F_f——种薯所受切刀摩擦力,N

将式(14)、(15)代入式(16)化简可得

$$\mu' E(A_1\varepsilon_1 + A_2\varepsilon_2) + G\cos\gamma - F_f > 0 \tag{17}$$

式中 A_1——种薯与上夹持辊接触面积,mm^2

A_2——种薯与下夹持辊接触面积,mm^2

ε_1——上夹持辊橡胶线应变,mm

ε_2——下夹持辊橡胶线应变,mm

由式(17)可以看出,影响种薯切块受力的主要因素为种薯与夹持辊接触面积 A_J、夹持辊中心线与水平方向夹角 γ。而种薯与夹持辊接触面积又与上下夹持辊竖直方向中心距 l 有关,若 l 过小,则夹持辊可能对种薯过度挤压至损坏;l 过大,种薯可能从夹持辊间隙漏出,造成漏切;同样,γ 过大,从定位输送链运送来的种薯可能无法准确抛入夹持辊间隙,造成种薯浪费;γ 过小,会使种薯进入夹持辊间隙时的姿态不固定,降低薯块均匀性。因此,γ 和 l 是影响切块合格率的重要因素。根据所需切块的种薯平均高度(53 mm),结合夹持辊内外环直径分别为 175、250 mm,设计 l 为 187 mm。为保证种薯能准确落入上下夹持辊间隙,在满足式(17)的条件下,设计 γ 为 36°。

3.3.3 夹持辊转速确定

种薯落入上下夹持辊间隙后,若夹持辊转速过快,易对种薯表皮造成损伤;若夹持辊转速过慢,可能造成种薯堵塞,影响切块效率。种薯从定向输送链到接触上下夹持辊的运动轨迹如图 11 所示。

种薯在定向输送链作用下以水平初速度 v_0 离开分级输送装置,在重力作用下做抛体运动至夹持辊上下间隙。设整个过程种薯水平位移为 s,竖直位移为 h_2,种薯运动末时刻速度为 v_1,夹持辊转速为 n,则种薯运动方程为

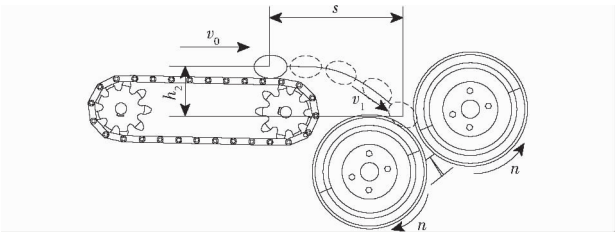


图 11 种薯运动轨迹

Fig. 11 Trajectory diagram of seed potatoes

$$\begin{cases} v_h^2 - v_y^2 = 2gh_2 \\ v_h = v_y + g\Delta t \end{cases} \tag{18}$$

式中 v_h——种薯在竖直方向上分速度,m/s

Δt——种薯做抛体运动时间,s

g——重力加速度,取 9.8 m/s^2

v_y——种薯在竖直方向上初速度,m/s

根据种薯位移求得其运动时间,代入种薯运动方程后可得种薯水平速度为

$$v_0 = s\sqrt{\frac{g}{2h_2}} \tag{19}$$

由式(18)、(19)可得种薯落入上下夹持辊间隙时刻的速度为

$$v_1 = \sqrt{2gh_2 + \frac{s^2 g}{2h_2}} \tag{20}$$

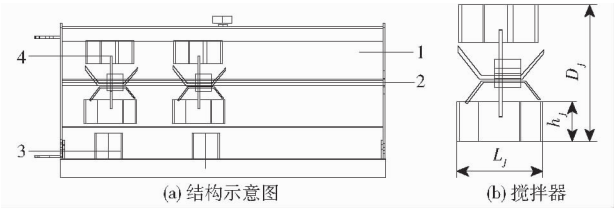
由于在种薯落入上下夹持辊间隙时刻,夹持辊线速度应大于种薯速度,否则夹持辊对种薯的摩擦力会阻碍种薯向切刀方向推进,因此夹持辊转速应满足

$$n \geqslant \sqrt{\frac{4gh_2^2 + s^2 g}{8\pi^2 r^2 h_2}} \tag{21}$$

由式(21)可看出,夹持辊转速有理论最小值。假设种薯与夹持辊接触半径 r 为定值,则夹持辊最小转速主要与输送链和夹持辊水平及竖直方向距离 s、h_2有关。根据定向输送链与上下夹持辊相对安装位置,确定 s 为 345 mm、h_2为 140 mm,代入式(19)可得定向输送链线速度为 2.04 m/s。为防止夹持辊转速过快,参考其它同类型夹持切块机构[20],在保证种薯能够通过夹持辊间隙情况下,综合考虑电机Ⅰ输出功率及定向输送链线速度,设计夹持辊转速为理论最小值 68 r/min。

3.4 拌种装置

拌种装置安装在夹持切块装置上方,其结构如图 12 所示。装置内部使用 2 个圆盘式涡轮搅拌器,电机Ⅱ通过链传动带动其旋转。拌种箱下方开有孔槽,箱内药剂在涡轮齿推动下从孔槽流出,孔槽下方安装拨片,可控制孔槽大小从而控制药剂流出量。



(a) 结构示意图　　(b) 搅拌器

图 12　拌种装置

Fig. 12　Schematic of structure of seed dressing device

1. 拌种箱　2. 涡轮轴　3. 导向凹槽　4. 涡轮搅拌器

药剂从孔槽流出经导向凹槽准确流入上下夹持辊间隙，对薯块完成拌种。参考文献[21]，圆盘式涡轮搅拌器叶片设计为梯形，根据夹持切块装置安装位置，结合夹持辊水平中心距为 256 mm，设计搅拌器直径 D_J 为 180 mm；为保证药剂搅拌均匀与定量排出，结合电机Ⅱ安装位置，设计叶片长度 L_J 为 103 mm，叶片高度 h_J 为 50 mm；综合考虑电机Ⅱ输出功率、夹持辊转速及切块效率，设计搅拌器转速为 100 r/min，药剂被搅拌器叶片曲面驱动，相较于其它类型叶片，梯形叶片具有较高的径向流量及泵出效率。

4　关键参数仿真

种薯分级效果对后续切块有直接影响，为保证所设计分级切块机分级能力，基于 EDEM 2020 - RecurDyn V9R4 耦合仿真结合理论分析确定上料量与主动链轮转速 n_2 关系、上料量范围和第 1 排辊组转速 n_1 范围，开展仿真试验，模拟实际作业情况，结合试验优化方法，得出最优参数组合。

4.1　仿真模型建立

根据种薯三轴尺寸，使用多球聚合颗粒模型模拟种薯外形特征。种薯模型如图 13 所示。

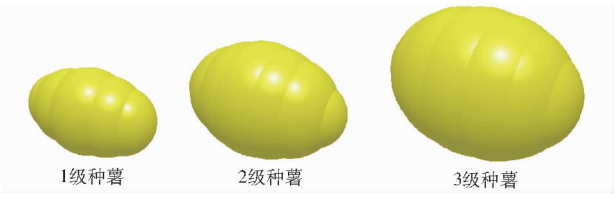


图 13　种薯模型

Fig. 13　Seed potato model

由于仿真只涉及到上料装置和分级输送装置，因此，首先在 Solidworks 2018 对整机进行简化，然后将模型以 x_t 格式导入 RecurDyn V9R4 添加约束和运动，最后导出为 Wall 文件并导入 EDEM 定义各部件材料类型。颗粒工厂设置在料斗正上方，根据料斗尺寸，设颗粒工厂尺寸为 300 mm × 500 mm；为防止种薯数量过多造成堆积，种薯生成质量设为 20 kg，生成速率为 40 kg/s。综合考虑上料时长及实际仿真时间，同时为了减小种薯分级统计误差，仿真时长设置为 15 s，仿真步数为 1 000 步。查阅文献[22 - 23]，种薯与种薯、种薯与材料间采用 Hertz - Mindlin(no slip)接触模型，仿真参数如表 3 所示。

表 3　仿真模型基本参数

Tab. 3　Parameters of simulation model

参数	数值
种薯泊松比	0.48
种薯密度/(kg·m^{-3})	1 048
种薯剪切模量/MPa	1.336
钢泊松比	0.30
钢密度/(kg·m^{-3})	7 800
钢剪切模量/MPa	8.2×10^4
海绵泊松比	0.47
海绵密度/(kg·m^{-3})	920
种薯间碰撞恢复系数	0.79
种薯-种薯静摩擦因数	0.42
种薯-种薯动摩擦因数	0.45
种薯-钢碰撞恢复系数	0.764
种薯-钢静摩擦因数	0.464
种薯-钢动摩擦因数	0.217
种薯-海绵碰撞恢复系数	0.70
种薯-海绵静摩擦因数	0.575
种薯-海绵动摩擦因数	0.026 5

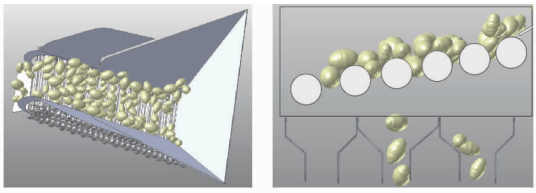
4.2　上料装置与辊组参数确定

由于需改变主动链轮转速调节上料量，因此首先要探究上料量与主动链轮转速关系。参考同类型分级装置[24]，当仿真条件设置为辊组倾斜角 10°、第 1 排辊组转速 97 r/min 时，分级精度和分级效率随上料量增加呈先增大后趋于平稳趋势，上料量在 34.2 ~ 68.4 kg/min 范围内某一数值下分级精度和分级效率有最优值。当上料量为 34.2 kg/min 时，主动链轮转速为 16.43 r/min，考虑到实际工况，设计 4 组试验，在 RecurDyn 中分别设置主动链轮转速为 18、36、54、72 r/min，仿真试验过程如图 14 所示。仿真结束后在 EDEM 中测量各转速下的种薯上料量，得到二者之间的关系曲线如图 15 所示。可以看出，当上料量为 34.2 ~ 68.4 kg/min 时，上料量与主动链轮转速呈线性正相关，此时主动链轮转速为 16.43 ~ 23.3 r/min。种薯落入分级输送装置时的速度与第 1 排辊组转速 n_1 满足关系式[25]

$$v = 2\pi r n_1 \mu \tag{22}$$

式中　v——种薯线速度，m/s

根据杆条升运链主动齿轮转速范围，可求得种薯从上料装置掉落到分级输送装置的速度为 0.41 ~ 1.01 m/s，代入式(22)，结合前述理论分析第 1 排辊组转速 n_1 最大值为 97 r/min，设计第 1 排辊组转速 n_1 为 85 ~ 97 r/min。



(a) 上料 (b) 分级

图 14 种薯上料和分级仿真

Fig. 14 Charging and classification simulation of seed potatoes

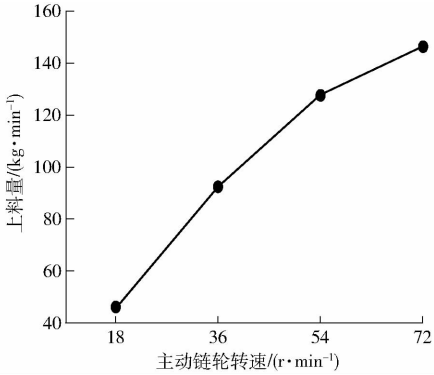


图 15 主动链轮转速与上料量关系曲线

Fig. 15 Curve of relationship between rotational speed of driving sprocket and feeding amount

4.3 分级输送装置参数确定

4.3.1 试验方案设计

在上料分级装置结构设计基础上,结合理论分析和仿真试验确定试验因素范围:辊组倾斜角为 5°~15°、上料量为 34.2~68.4 kg/min、第 1 排辊组转速为 85~97 r/min。以分级精度 Y_1 和分级效率 Y_2 为评价指标,通过三因素三水平进行 Box-Behnken 中心组合设计,对试验结果进行方差分析、对试验因素进行显著性检验,利用响应面近似模型对参数组合优化,以得出最优因素水平组合。试验因素编码如表 4 所示。Y_1 和 Y_2 计算式为

$$Y_1 = \frac{T_1}{T_2} \times 100\% \tag{23}$$

$$Y_2 = \frac{60T}{t_1} \tag{24}$$

式中 T_1——符合每一级尺寸范围的种薯总质量,kg

T_2——每一级分选种薯的上料总质量,kg

T——分级辊组筛选的种薯总质量,kg

t_1——分级时间,s

表 4 试验因素编码

Tab. 4 Test factors and coding

编码	因素		
	辊组倾斜角/(°)	上料量/(kg·min⁻¹)	第 1 排辊组转速/(r·min⁻¹)
-1	5	34.2	85
0	10	51.3	91
1	15	68.4	97

4.3.2 结果分析与参数优化

使用 Design-Expert 对试验结果进行二次回归方程分析,并进行二次回归拟合,试验方案及结果如表 5 所示,X_1、X_2、X_3 为因素编码值,得到分级精度 Y_1、分级效率 Y_2 的二次回归模型方程为

$$\begin{aligned} Y_1 = {} & 92.44 + 2.95X_1 - 4.67X_2 - 2.05X_3 - \\ & 1.25X_1X_2 + 2X_1X_3 - 1.4X_2X_3 - \\ & 7.82X_1^2 + 1.73X_2^2 - 3.37X_3^2 \end{aligned} \tag{25}$$

$$\begin{aligned} Y_2 = {} & 49.68 + 5.70X_1 + 8.25X_2 - 3.90X_3 - \\ & 5.25X_1X_2 + 8.25X_1X_3 + 3.75X_2X_3 - \\ & 4.81X_1^2 - 0.915X_2^2 - 2.415X_3^2 \end{aligned} \tag{26}$$

表 5 试验方案与结果

Tab. 5 Test scheme and results

试验序号	因素			Y_1/%	Y_2/(kg·min⁻¹)
	X_1	X_2	X_3		
1	0	1	-1	90.2	50.4
2	-1	1	0	80.7	50.5
3	0	0	0	91.4	53.4
4	1	0	-1	85.0	44.4
5	0	0	0	92.5	50.8
6	0	1	1	82.7	51.4
7	0	-1	1	94.2	32.5
8	1	1	0	82.0	52.4
9	-1	-1	0	88.2	32.5
10	1	0	1	85.5	52.8
11	0	0	0	92.5	49.0
12	1	-1	0	94.5	39.0
13	0	-1	-1	96.1	49.3
14	-1	0	1	73.5	32.0
15	0	0	0	92.0	50.6
16	-1	0	-1	81.0	49.6
17	0	0	0	93.8	50.6

回归模型方差分析如表 6、7 所示,X_1、X_2、X_3 的 P 值均小于 0.01,说明 3 个因素对 Y_1、Y_2 影响极显著,三者对 Y_1 影响的主次顺序为 X_2、X_1、X_3;对 Y_2 影响的主次顺序为 X_2、X_3、X_1;回归方程模型 P 值均小于 0.01,2 个回归模型均达极显著水平,且失拟项均大于 0.05,表明回归方程可靠;决定系数 R^2 分别为 0.979、0.958 3,均接近于 1,说明模型拟合效果好;变异系数为 1.58%、5.02%,表明数据变异程度小,试验可信度高;精确度分别为 20.525、12.137,均大于 4,表明回归模型有良好的信噪比,精确度良好。综上所述,拟合的回归方程适应性较好,可进行后续优化设计。

4.3.3 响应曲面分析

为探究各因素交互作用对分级精度与分级效率的影响,根据 Design-Expert 得出的二次回归方程,

表 6　分级精度 Y_1 方差分析

Tab. 6　Variance analysis of classification accuracy Y_1

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	631.24	9	70.14	36.32	<0.000 1 **
X_1	69.62	1	69.62	36.05	0.000 5 **
X_2	174.84	1	174.84	90.55	<0.000 1 **
X_3	33.62	1	33.62	17.41	0.004 2 **
X_1X_2	6.25	1	6.25	3.24	0.115 0
X_1X_3	16.00	1	16.00	8.29	0.023 7 *
X_2X_3	7.84	1	7.84	4.06	0.083 8
X_1^2	257.48	1	257.48	133.3	<0.000 1 **
X_2^2	12.60	1	12.60	6.53	0.037 8 *
X_3^2	47.82	1	47.82	24.76	0.001 6 **
残差	13.52	7	1.93		
失拟项	10.38	3	3.46	4.42	0.092 5
误差	3.13	4	0.78		
总和	644.76	16			

注：** 表示差异极显著（$P<0.01$），* 表示差异显著（$0.01\leqslant P<0.05$），下同。

表 7　分级效率 Y_2 方差分析

Tab. 7　Variance analysis of grading efficiency Y_2

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	877.80	9	97.53	17.86	0.000 5 **
X_1	72.00	1	72.00	13.19	0.008 4 **
X_2	330.25	1	330.25	60.49	0.000 1 **
X_3	78.13	1	78.13	14.31	0.006 9 **
X_1X_2	5.29	1	5.29	0.97	0.357 7
X_1X_3	169.00	1	169.00	30.95	0.000 8 **
X_2X_3	79.21	1	79.21	14.51	0.006 6 **
X_1^2	75.70	1	75.70	13.86	0.007 4 **
X_2^2	38.91	1	38.91	7.13	0.032 0 *
X_3^2	15.85	1	15.85	2.90	0.132 2
残差	38.22	7	5.46		
失拟项	28.17	3	9.39	3.74	0.117 6
误差	10.05	4	2.51		
总和	916.02	16			

使用 Origin 软件绘制交互作用对试验指标影响显著的响应曲面并进行分析。

由图 16a 可知，当第 1 排辊组转速为固定值时，分级精度随辊组倾斜角增大呈先上升后下降趋势，最优辊组倾斜角在 10°～12°之间；当辊组倾斜角为固定值时，分级精度随第 1 排辊组转速增加先增大后减小，第 1 排辊组转速最佳范围为 88～92 r/min。

由图 16b 可知，当上料量一定、辊组倾斜角较小时，分级效率随第 1 排辊组转速增大而降低，这是因为当辊组倾斜角较小时，种薯受重力影响较小，主要靠辊轮给予的力矩向前运动，但过快的转速可能导致种薯抛飞从而降低分级效率；辊组倾斜角较大时，分级效率随第 1 排辊组转速增大先上升后逐渐平稳。

由图 16c 可知，当辊组倾斜角与第 1 排辊组转速为定值时，分级效率随上料量呈先上升后趋于平稳趋势，分级效率趋于平稳时上料量为 50 kg/min。当上料量大于 50 kg/min 时，分级效率随第 1 排辊组转速增加先增大后减小。

4.3.4　参数优化

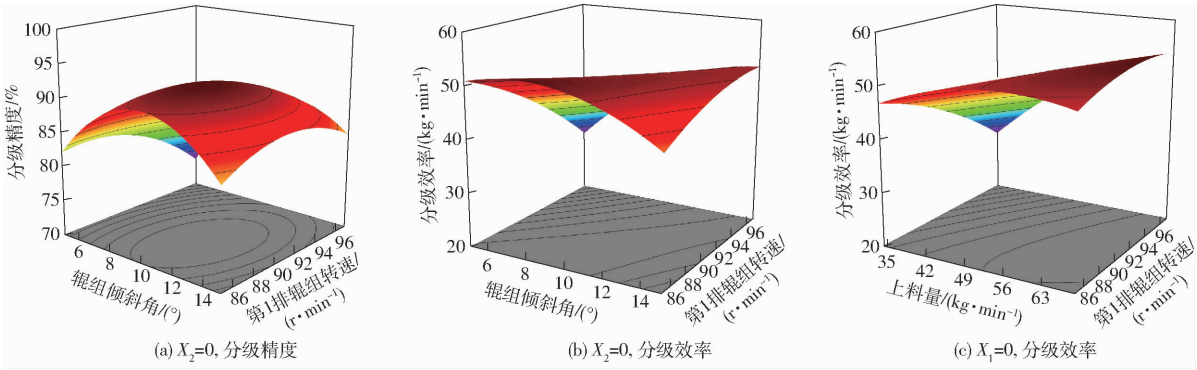
为得到最佳分级效率及分级精度，以分级精度和分级效率最大为优化目标，结合回归模型及各试验因素边界条件，选择优化目标和约束条件为

$$\begin{cases}\max Y_1\\ \max Y_2\\ \text{s.t.}\begin{cases}-1\leqslant X_1\leqslant 1\\ -1\leqslant X_2\leqslant 1\\ -1\leqslant X_3\leqslant 1\end{cases}\end{cases}\tag{27}$$

基于 Design-Expert 软件中 Optimization 模块对目标函数进行优化并求解，得到最优参数组合为：辊组倾斜角 10.53°、上料量 52.22 kg/min、第 1 排辊组转速 88.7 r/min，此时分级精度为 92.65%、分级效率为 52.04 kg/min。

5　样机试验

为验证马铃薯种薯分级切块机性能，在山东农业大学马铃薯种植试验基地进行样机试验，种薯品



(a) X_2=0, 分级精度　(b) X_2=0, 分级效率　(c) X_1=0, 分级效率

图 16　双因素响应曲面

Fig. 16　Two-factor response surfaces

种为荷兰 15 号,以分级精度 Y_1、分级效率 Y_2、切块合格率 Y_3和切块效率 Y_4为评价指标。根据最优参数组合,考虑实际加工精度与测量精度,取辊组倾斜角为 11°,主动链轮转速为 21 r/min,第 1 排辊组转速为 89 r/min。进行 8 组验证试验,测量结果取 8 次试验平均值。试验结果如表 8 所示,试验过程如图 17 所示。Y_3和 Y_4表达式为

$$Y_3 = \frac{Q}{P} \times 100\% \tag{28}$$

$$Y_4 = \frac{60Q_1}{t_2} \tag{29}$$

式中 P——薯块总数,块

Q——满足质量为 35 ~ 70 g 且包含 1 个以上健康芽眼的薯块数量,块

Q_1——完成切块的种薯总质量,kg

t_2——完成切块总时间,s

表 8 样机试验结果

Tab. 8 Experimental results of prototype

试验号	Y_1/%	Y_2/(kg·min^{-1})	Y_3/%	Y_4/(kg·min^{-1})
1	90.27	50.42	94.53	49.13
2	91.55	49.33	98.64	47.55
3	94.86	50.85	97.76	49.25
4	92.38	49.0	95.85	48.65
5	91.83	48.0	93.71	47.53
6	90.75	49.66	93.62	48.27
7	90.34	47.82	96.86	46.69
8	91.47	50.50	94.94	48.85
平均值	91.67	49.44	95.75	48.24

由表 8 可知,分级精度 91.67%,分级效率 49.44 kg/min。与最优组合下仿真结果基本一致,相对误差小于 5%。在该工作参数下,夹持切块装置切块速度能匹配分级输送装置筛分的种薯数量,切块效率为 48.24 kg/min;上下夹持辊能有效固定种薯姿态,切块合格率为 95.75%,且薯块均匀性好,满足种薯切块农艺要求。



图 17 试验过程及切块效果

Fig. 17 Test process and segmentation effect

6 结论

(1)设计了一款小型辊组式马铃薯种薯分级切块机,通过理论分析和数值计算确定了影响分级效果的主要因素为辊组倾斜角、第 1 排辊组转速和上料量,影响切块效果的主要因素为夹持辊竖直方向中心距、夹持辊中心线与水平方向夹角和夹持辊转速。

(2)以辊组倾斜角、第 1 排辊组转速、上料量为试验因素,以分级效率和分级精度为评价指标,基于 EDEM - RecurDyn 耦合仿真对上料分级过程进行分析和 Box - Behnken 仿真试验,进一步确定试验因素取值范围为辊组倾斜角 5° ~ 15°、第 1 排辊组转速 85 ~ 97 r/min、上料量 34.2 ~ 68.4 kg/min。由 Box - Behnken 中心组合试验方法确定试验因素最优参数组合为辊组倾斜角 10.53°、第 1 排辊组转速 88.7 r/min、上料量 52.22 kg/min。

(3)样机试验结果表明,最优参数组合下,分级精度为 91.67%,分级效率为 49.44 kg/min,此时切块合格率为 95.75%,切块效率为 48.24 kg/min,薯块均匀性好,满足种薯切块农艺要求。

参 考 文 献

[1] 王虎存, 赵武云, 孙伟, 等. 马铃薯机械化收获技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 1 - 22.
WANG Hucun, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Research progress on the technology and equipment for potato mechanized harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(14): 1 - 22. (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与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] 吕金庆, 杨晓涵, 李紫辉, 等. 纵横刀组协同式马铃薯种薯切块装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 89 - 97.
LÜ Jinqing, YANG Xiaohan, LI Zihui, et al. Design and test of seed potato cutting device with vertical and horizontal knife group[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 89 - 97. (in Chinese)

[4] 王相友, 刘为龙, 张浩, 等. 整列定位夹切组合式马铃薯种薯切块装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 148 - 158.
WANG Xiangyou, LIU Weilong, ZHANG Hao, et al. Design and experiment of seed potato cutting device of sorting-positioning

and clamping-cutting combined[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 148 – 158. (in Chinese)
[5] 单信和, 王崇庆, 李学强, 等. 马铃薯种薯切块机四爪同步式夹持装置设计[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(5): 127 – 132.
SHAN Xinhe, WANG Chongqing, LI Xueqiang, et al. Design of a four-jaw synchronous clamping device for seed potato cutting machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(5): 127 – 132. (in Chinese)
[6] 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.
FENG Wei, LI Ping, ZHANG Xianfeng, et al. Design and experiment of intelligent cutting machine for potato seed[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(12): 124 – 129. (in Chinese)
[7] 徐子原, 孙步功, 祁渊, 等. 链盘动刀式马铃薯种薯自动切块机取种装置设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(9): 167 – 178.
XU Ziyuan, SUN Bugong, QI Yuan, et al. Design and experiment of seed picking device for seed potato automatic slicing machine with chain disc moving knife[J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(9): 167 – 178. (in Chinese)
[8] 张万枝, 曾祥, 刘树峰, 等. 基于改进 YOLO v5s 的马铃薯种薯芽眼检测方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 260 – 269.
ZHANG Wanzhi, ZENG Xiang, LIU Shufeng, et al. Detection method of potato seed bud eye based on improved YOLO v5s [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 260 – 269. (in Chinese)
[9] 张万枝, 张弘毅, 刘树峰, 等. 基于改进 YOLO v7 模型的马铃薯种薯芽眼检测[J]. 农业工程学报, 2023, 39(20): 148 – 158.
ZHANG Wanzhi, ZHANG Hongyi, LIU Shufeng, et al. Detection of potato seed buds based on an improved YOLO v7 model [J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(20): 148 – 158. (in Chinese)
[10] 陈志伟. 基于 YOLOX 的马铃薯种薯芽眼检测与自动切块试验研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
CHEN Zhiwei. Research on the detection and automatic cutting test of seed potato buds based on YOLOX[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022. (in Chinese)
[11] 魏忠彩, 王业炜, 苏国梁, 等. 马铃薯机械化收获除杂技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报, 2024, 40(10): 1 – 13.
WEI Zhongcai, WANG Yewei, SU Guoliang, et al. Research progress in the technology and equipment for potato mechanized harvesting and impurity removal[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(10): 1 – 13. (in Chinese)
[12] 王兴欢, 魏忠彩, 苏国梁, 等. 马铃薯收获机扰动分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(4): 101 – 112.
WANG Xinghuan, WEI Zhongcai, SU Guoliang, et al. Design and experiment of simple harmonic disturbance separation device for potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 101 – 112. (in Chinese)
[13] 张永志, 李旭英, 高盛博. 辊式尼龙刷马铃薯清选分级机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(6): 152 – 155, 160.
ZHANG Yongzhi, LI Xuying, GAO Shengbo. Design and test of roller nylon brush potato cleaning and classifying machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(6): 152 – 155, 160. (in Chinese)
[14] 任志琦. 活动转板式马铃薯分级装置设计与试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
REN Zhiqi. Design and experimental study of the movable rotating plate type grading device for potato[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[15] 刘兴. 马铃薯输送分级装置设计与试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
LIU Xing. Design and experimental research on potato conveying and grading device[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese)
[16] DU Xinwu, LIU Jin, ZHAO Yueyun, et al. Design and test of discrete element-based separation roller potato-soil separation device[J]. Agriculture, 2024, 14(7): 1053.
[17] ZHAO Haohao, DENG Weigang, XIE Shengshi, et al. Performance optimization and experimental study of small-scale potato-grading device[J]. Agriculture, 2024, 14(6): 822.
[18] 张航. 马铃薯切种机整列装置的设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
ZHANG Hang. Design and experiment on sorting device for seed potatoes cutting machine[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[19] 杨晓涵. 纵横刀组协同式马铃薯切种机关键装置设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2021.
YANG Xiaohan. Design and experiment of key equipment of seed potatoes cutting machine with vertical and horizontal knife group cooperative[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021. (in Chinese)
[20] 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)
[21] 王颖慧, 郝琳, 朱振兴, 等. 圆盘涡轮式搅拌器的搅拌性能比较分析[J]. 化学工业与工程, 2023, 40(2): 123 – 132.
WANG Yinghui, HAO Lin, ZHU Zhenxing, et al. Comparison and analysis of stirring performance stirred by disc turbine agitators[J]. Chemical Industry and Engineering, 2023, 40(2): 123 – 132. (in Chinese)
[22] 石林榕, 孙伟, 赵武云, 等. 马铃薯种薯机械排种离散元仿真模型参数确定及验证[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 35 – 42.
SHI Linrong, SUN Wei, ZHAO Wuyun, et al. Parameter determination and validation of discrete element model of seed potato mechanical seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 35 – 42. (in Chinese)
[23] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 125 – 135, 142. (in Chinese)
[24] 吕金庆,温信宇,李紫辉,等.马铃薯种薯切块机分级装置的设计与试验[J].农业工程学报,2020,36(20):76 – 83.
LÜ Jinqing, WEN Xinyu, LI Zihui, et al. Design and experiment of the grading device for a potato seed cutting machine[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 76 – 83. (in Chinese)
[25] 吕金庆, 于佳钰, 冯雪, 等. 辊式马铃薯分级机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 323 – 332.
LÜ Jinqing, YU Jiayu, FENG Xue, et al. Design and experiment of roller potato grading machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 323 – 332. (in Chinese)