

马铃薯收获机辊组式薯土分离装置设计与试验

杨然兵^{1,2} 田光博¹ 尚书旗¹ 王炳军³ 张 建¹ 翟宇鸣¹

(1. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109; 2. 海南大学机电工程学院, 海口 570228;
3. 胶州市农业农村局, 青岛 266109)

摘要: 针对目前传统马铃薯收获机分离装置存在伤薯率高、去土率低以及分离装置结构形式单一且调节不便的问题,设计了一款由聚氨酯材料构成的左右螺旋对称式去土辊与可调节式光辊交替排列组合的马铃薯收获机辊组式输送分离装置。通过针对机体结构的动力学分析、薯土分离的耦合机理分析和去土过程马铃薯之间碰撞离散分析,确定了影响马铃薯收获机辊组式输送分离装置伤薯率和去土率的关键因素,并对其进行试验,以伤薯率和去土率为试验指标,以去土辊和光辊间距和转速、输送分离装置倾斜角为试验因素,根据正交试验结果建立数学回归模型并进行响应面分析和参数化分析,确定当去土辊与光辊间距为 16.5 mm、去土辊转速为 100 r/min、光辊转速为 100 r/min、分离装置倾斜角为 8°时,伤薯率为 0.64%,去土率为 97.1%。与传统马铃薯收获机分离装置相比,伤薯率下降 0.12 个百分点,去土率上升 2.6 个百分点,该装置能更好地满足输送分离要求。

关键词: 马铃薯收获机; 辊组式; 输送分离装置; 去土效率

中图分类号: S225.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)02-0107-12 **OSID:** 

Design and Experiment of Roller Group Type Potato Soil Separator for Potato Harvester

YANG Ranbing^{1,2} TIAN Guangbo¹ SHANG Shuqi¹ WANG Bingjun³ ZHANG Jian¹ ZHAI Yuming¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China
3. Jiaozhou Agricultural and Rural Bureau, Qingdao 266109, China)

Abstract: Aiming at the problems of high potato damage rate, low soil removal rate, single structure and inconvenient adjustment of the separation device of the traditional potato harvester, a left and right spiral symmetrical soil removal roller and adjustable type made of polyurethane material were designed. The smooth rollers were alternately arranged and combined in the potato harvester roller group conveying and separating device. Through the dynamic analysis of the machine body structure, the coupling mechanism analysis of potato-soil separation and the discrete analysis of the collision between potatoes in the soil removal process, the key factors affecting the potato damage rate and soil removal rate of the roller-type conveying and separating device of the potato harvester were determined. And it was tested, taking the potato damage rate and soil removal rate as the test index, taking the distance between the soil removal roller and the smooth roller, the rotation speed and the inclination angle of the conveying separation device as the experimental factors, a mathematical regression model was established for the orthogonal test results, and a response surface analysis was carried out. Through analysis and parametric analysis, it was determined that when the distance between the soil removal roller and the smooth roller was 16.5 mm, the speed of the soil removal roller was 100 r/min, the speed of the smooth roller was 100 r/min, and the inclination angle of the separation device was 8°, the damage potato rate was 0.64%, and soil removal rate was 97.1%. Compared with the traditional potato harvester separation device, the potato damage rate was decreased by 0.12 percentage points, and the soil removal rate was increased by 2.6 percentage points. The device can meet the requirements of conveying separation.

Key words: potato harvester; roller group type; conveying and separating device; soil removal efficiency

收稿日期: 2022-04-05 修回日期: 2022-05-05
基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系建设项目(CARS-09-P32)
作者简介: 杨然兵(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备研究,E-mail: yangranbing@163.com
通信作者: 尚书旗(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备研究,E-mail: sqshang@qau.edu.cn

0 引言

马铃薯作为全世界种植最广泛的作物之一,在饲料、工业等方面都发挥着巨大的作用。华北地区春季马铃薯收获主要集中在每年的第二季度末和第三季度初,收获期天气雨水较多,土壤含水量较高,因此,收获的马铃薯表面会带有一部分黏土,这部分黏土不易脱落。由于当前市场上主流收获机缺乏薯块-黏土分离的去土装置,所以无法对马铃薯表面附着的黏土进行有效分离^[1-2]。

国外相关科研单位对马铃薯收获机黏土分离装置进行了研究^[3],其中代表性技术有:四排指型刮刀网筛分器、循环刺猬网与双刮板滚筒组成的输送分离装置、Vario-RS 分离单元和双重多级除杂器 MultiSep^[4]。此外,国外的马铃薯收获机输送分离装置还加入了机电一体化控制技术,在注重去土效率的同时对马铃薯产生更好的保护作用^[5-6]。

我国对相关技术的研究起步较晚,2000 年以后一些科研院所才陆续展开相关研究。魏忠彩等^[7]设计的输送分离装置中清杂辊和光辊会形成一个速度差,从而对马铃薯产生摩擦去土的效果。张恒^[8]设计的针对马铃薯的清选装置为左旋和右旋交替排列的尼龙毛刷辊,从而使马铃薯在清选辊上可以翻转均匀去土。王相友等^[9]设计的左右旋弹簧式马铃薯输送分离装置,可以减少输送过程中的马铃薯集中堆向一侧,保证连续性,减少对马铃薯的挤压。杨然兵等^[10]设计了一种马铃薯收获机拨辊推送式输送分离装置,可初步实现马铃薯薯土输送分离要求。但目前我国对输送分离装置、薯块-黏土分离以及薯块损伤的理论研究还处于初级阶段,各装置的结构形式单一且分离效果地区针对性强,未能有效解决各地区马铃薯收获作业伤薯率较高、去土率较低等问题。

针对以上问题,本文设计一种去土辊和光辊间距和转速、装置倾斜角度可调的马铃薯收获机输送分离装置,通过对马铃薯去土过程的动力学分析、黏土的薯土分离过程分析、去土过程马铃薯碰撞辅助分析,采用二次旋转正交试验进行性能测试,探究去土辊和光辊间距及转速、装置倾斜角对伤薯率和去土率的影响规律,以及输送分离装置去土过程的运动规律,并通过田间试验验证马铃薯收获机输送分离装置的去土效果。

1 装置整体结构与工作原理

1.1 装置整体结构

输送分离装置是马铃薯收获机的核心部件,主

要部件包括液压马达、带轮、链轮、去土辊、光辊、刮土板、马达支架、固定杆、连接杆、弹簧、侧挡板等,其结构组成如图 1 所示。

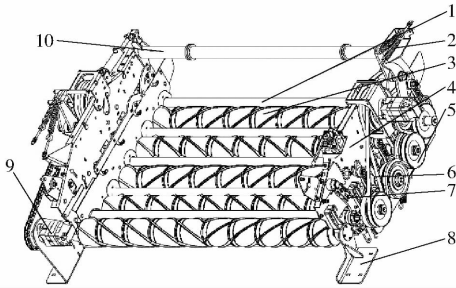


图 1 输送分离装置结构图

Fig.1 Structure diagram of flexible separation device

1. 光辊和刮土板 2. 支撑弹簧 3. 去土辊 4. 机架 5. 传动带轮 6. 传动带 7. 间距调节板 8. 支撑板 9. 液压马达 10. 支撑连接杆

1.2 工作原理和主要技术参数

马铃薯从前端装置落至输送分离装置中,液压马达驱动带轮和链轮转动,带动去土辊和光辊转动,光辊和去土辊采用交错排列、高低组合的安装方式,保证马铃薯在受力均匀的同时避免马铃薯由于薯块大小的原因堆积,通过去土辊和光辊的转动对马铃薯产生摩擦碰撞的作用达到去土的目的,光辊下方安装有刮土板可以去除粘结在光辊上的黏土,分离的土壤直接掉落在收获完成的土地里。辊组式马铃薯收获机分离装置作业原理如图 2 所示。

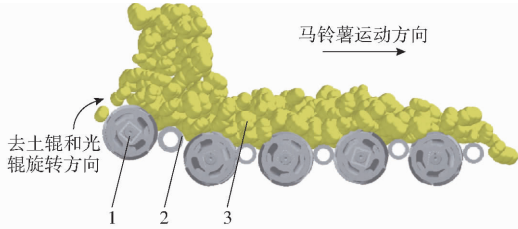


图 2 辊组式马铃薯收获机分离装置作业原理图

Fig.2 Operation diagram of separation device of roller group potato harvester

1. 去土辊 2. 光辊 3. 马铃薯

辊组式马铃薯收获机分离装置主要技术参数如表 1 所示。

表 1 辊组式马铃薯收获机分离装置主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of flexible separation device for roller group potato harvester

参数	数值
尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 970×1 355×700
液压马达额定压力/MPa	8
液压马达排量/(L·min ⁻¹)	3.2
去土辊转速/(r·min ⁻¹)	70~130
光辊转速/(r·min ⁻¹)	70~130
去土辊和光辊间距/mm	13~20
分离装置倾角/(°)	5~11

2 关键部件设计

根据马铃薯在升运过程的损伤机理研究可知^[11-12],在马铃薯联合收获机输送过程中,辊组式分离装置与前端升运链输送装置存在一定的高度差,可导致马铃薯在跌落过程中产生碰撞损伤,由马铃薯收获机升运机理可知,安全高度的落差应在 300 mm 以下,因此本文中马铃薯输送分离装置的马铃薯跌落高度设计为 200 mm,使对马铃薯的损伤程度降到最小。

去土辊与光辊交错排列在两端支撑杆架上,且高低交错,两个液压马达分别固定在马达支架上,首个去土辊和光辊通过链传动连接,其动力来源为装置前置液压马达,其余去土辊和光辊由后置液压马达驱动带轮提供动力,两个侧挡板分别固定在支撑架上,保护马铃薯,为避免马铃薯与侧挡板碰撞损伤,在侧挡板上安装橡胶挡板,最大限度减小马铃薯的损伤。

2.1 去土辊和光辊材料选择

去土辊和光辊的材料是影响马铃薯去土率和伤薯率的关键因素,需选择一种具有高弹性和高强度的材料来保证分离装置作业时可以提高去土效率并减少对马铃薯的损伤。根据市场调研和工厂实地考察,目前市场上在农业机械领域最常用的两种材料为聚氨酯弹性体和橡胶。两者都是高分子材料,都具有在大的形变下快速恢复的能力,但是两者分子链结构完全不同,所以两者之间的力学特性有较大差异。本文通过探究聚氨酯弹性体和橡胶的应力-应变曲线来比较两者之间的性能差异,从而确定去土辊和光辊的材料。

如图 3 所示,聚氨酯弹性体与橡胶材料的压应力-应变曲线存在较大差异,在聚氨酯弹性体材料和橡胶材料形变初期,聚氨酯弹性体的变形很小,表现出了一定的刚性。聚氨酯弹性体材料相对于橡胶材料产生相同的应变需附加较大的外力。在低应力状态下,聚氨酯弹性体比橡胶材料具有优异的高弹性。聚氨酯弹性体材料在断裂前应力迅速增加,橡胶材料在断裂前应力增加缓慢,即需要受到较大的外力才能造成聚氨酯弹性体的破裂,保证了聚氨酯弹性体材料具有较高强度。因此本文的去土辊和光辊的表面材料选取聚氨酯弹性体。

2.2 去土辊和光辊结构设计

本文设计的去土辊为交替排列、高低组合、旋向相反的对称一体式结构。去土辊中间采用镂空的设计既节省了材料又减轻了分离装置的重量,镂空部分设计为环绕对称的圆弧形槽口,既保证了去土辊

受力均匀又提高了去土辊承载能力,其结构简图如图 4 所示。

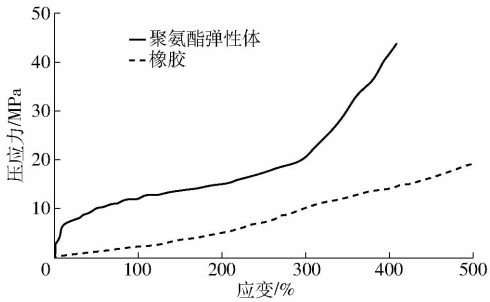


图 3 聚氨酯弹性体和橡胶材料压应力-应变曲线
Fig. 3 Compressive stress - strain curves of polyurethane elastomers and rubber materials

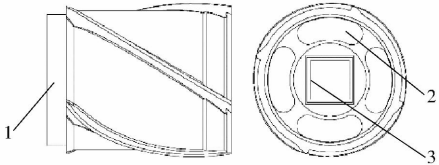


图 4 去土辊结构简图
Fig. 4 Structure diagram of soil removal roller
1. 去土辊单元 2. 镂空圆弧 3. 方管穿口

去土辊外周为旋向相反的螺纹,可以避免在作业过程中马铃薯由于旋向一致而向一侧堆积的问题,从而进一步提高去土效率。螺纹和螺距是保证去土效率的关键参数,过大会降低去土质量和马铃薯与去土辊、光辊的摩擦面积及摩擦时间,过小则会造成堵塞,加重马铃薯之间的挤压程度,从而对马铃薯造成破坏。收获时马铃薯薯块的长轴长度为 30 ~ 150 mm,为保证马铃薯不卡在去土辊的螺纹沟槽内,并参考大部分马铃薯清选机除杂装置的除杂辊结构和尺寸^[13-14],本文去土辊螺距选为 140 mm,螺纹高度为 9 mm,去土辊外轮廓直径为 152 mm,长度为 1 650 mm,其结构如图 5 所示。光辊的外轮廓直径为 65 mm,长度为 1 650 mm,其结构如图 6 所示。



图 5 去土辊结构图
Fig. 5 Structure drawing of desliming roller

1. 弹性挡圈 2. 去土辊轴部法兰 3. 短右旋去土辊 4. 方管穿轴 5. 左侧去土辊 6. 短左旋去土辊

2.3 去土辊与光辊组数及排列方式设计

去土过程中的马铃薯会经过每一个去土辊和光辊,从而在去土辊和光辊处产生滚动和摩擦,或者与去土辊和光辊产生碰撞,达到去除马铃薯表面黏土

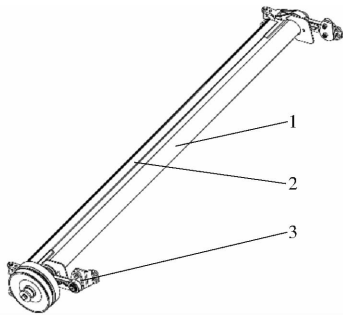


图 6 光辊结构组图

Fig. 6 Structure group diagram of smooth roller

1. 光辊 2. 刮土板 3. 齿轮组

的效果^[15-16],但去土辊和光辊的数量不能过多,否则会产生过度的滚动摩擦和碰撞,对马铃薯造成损伤,过少不能完全去除马铃薯表面附着的泥土。因此,对去土辊和光辊数量的选择要适中。去土辊和光辊采用交错排列,高低组合的方式,第一组去土辊和光辊进行倾斜状布置,在去土过程中可以给马铃薯提供一个更大的初速度,达到更好的去土效果。光辊采用可移动布置,以便调整去土辊和光辊之间的距离,满足清土分离作业的实际需求。当马铃薯表面的黏土较多时,增大光辊与去土辊的距离,当马铃薯表面的黏土较少时,可适当减小去土辊和光辊的间距。

对去土辊和光辊组数进行单因素试验,试验中去土辊和光辊间距为 16.5 mm,装置倾角为 8°,去土辊转速为 100 r/min,光辊的转速为 100 r/min,以伤薯率和去土率为试验指标,试验结果如表 2 所示,由表 2 可以看出,随着去土辊和光辊组数的增加,去土率增加,伤薯率也增加。当组数达到一定程度时,去土率增长缓慢,伤薯率增长加快,结合生产成本等因素后,去土辊和光辊组数选用 5 组。

表 2 去土辊和光辊组数对去土质量影响试验结果

Tab. 2 Experimental results of influence of number of soil removing roller and smooth roller groups on soil removing quality

removing quality		%
去土辊和光辊组数	去土率	伤薯率
3	82.3	0.61
4	90.1	0.64
5	95.6	0.75
6	95.8	0.79
7	96.1	0.81

2.4 传动方式设计

辊组式马铃薯收获机分离装置动力传动如图 7 所示,液压马达输入轴与带轮输出轴相连接,从而驱动带轮传动,主带轮与其下方驱动去土辊的 4 个带轮(除首个去土辊)通过各传动带连接,从而驱动传

动轴转动,整个带传动系统连接形式为波浪形,为防止带轮过于张紧,设有张紧轮保护传动带,光辊的传动系统连接方式与去土辊连接方式相同,光辊传动系统与去土辊传动系统对称分布在机架两侧,保证了整个辊组式马铃薯收获机分离装置的稳定性。首个去土辊和光辊通过齿轮链传动连接,在保证首个去土辊和光辊传动不受后面去土辊和光辊转速影响下实现差速,而且可以保证辊组式马铃薯收获机分离装置的倾角。拖拉机动力输出轴与液压泵相连接,由液压泵带动液压马达工作,从而带动整个液压系统工作。通过电控电磁线圈式调速阀控制液压马达流量,达到控制输送分离装置转速的目的。

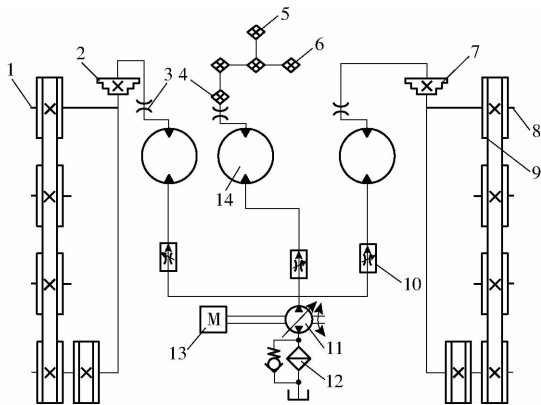


图 7 动力传动结构简图

Fig. 7 Transmission structure group diagram

1. 其余 4 根去土辊 2. 去土辊侧主动塔式传动带轮 3. 动力输入轴 4. 主动塔式链轮 5. 第 1 根光辊 6. 第 1 根去土辊 7. 光辊侧主动塔式传动带轮 8. 其余 4 根光辊 9. 传动带轮 10. 电控电磁线圈式调速阀 11. 液压泵 12. 过滤器 13. 拖拉机发动机 14. 液压马达

3 马铃薯与去土辊、光辊作用动力学分析

3.1 动力学分析

马铃薯从输送装置落至辊组式马铃薯收获机分离装置,在输送分离装置中通过去土辊和光辊的配合完成对马铃薯的去土过程,马铃薯在去土辊和光辊的受力情况如图 8 所示,把马铃薯近似为一个椭圆,假设马铃薯的长轴长度为 a_1 ,短轴长度为 a_2 ,去土辊直径为 d_1 ,光辊直径为 d_2 ,去土辊和光辊间距为 l ,装置倾斜角为 θ ,去土辊和光辊转速为 n_1 ,马铃薯转速为 n_2 ,马铃薯重心为点 O_1 ,马铃薯与去土辊、光辊相切点分别为 O_2 、 O_3 。

对马铃薯在去土辊和光辊的接触受力分析可得,马铃薯受力分别是马铃薯自身所受的重力 mg 、去土辊对马铃薯的支持力 F_{n_1} 和摩擦力 f_1 、光辊对马铃薯的支持力 F_{n_2} 和摩擦力 f_2 。通过对马铃

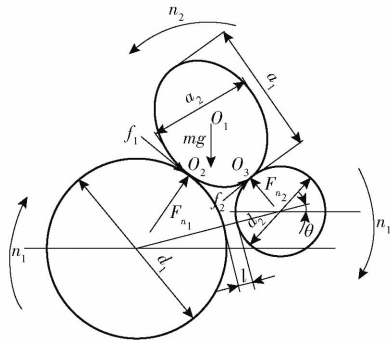


图 8 马铃薯纵向受力分析图

Fig. 8 Analysis of potato longitudinal force

薯输送分离装置整体作业的连续性分析,如果要使马铃薯翻越光辊,就要保证各个力对马铃薯的合力矩大于 0^[9,17]。

马铃薯在输送分离装置上运动中,马铃薯与去土辊、光辊的接触位置不断变化,由此力的接触位置也不断变化,而且马铃薯与去土辊、光辊还会有碰撞运动,对力的分析也无法确定,因此对马铃薯的坐标进行变换,将马铃薯所处的坐标系位置进行坐标系旋转变换和坐标系平移变换,转换到去土辊所在的坐标系,然后再加以分析。其变换的具体过程如图 9 所示。马铃薯短轴与水平线的夹角为 α , β 为支持力 F_{n1} 与去土辊和光辊连线的夹角,坐标系的选择为:以马铃薯的长轴为横坐标轴 x_1 、短轴为纵坐标轴 y_1 ,构成 x_1y_1 坐标系;以马铃薯的重心为坐标原点,以水平线为横坐标轴 x_2 、垂直线为纵坐标轴 y_2 ,构成 x_2y_2 坐标系;以去土辊的圆心为坐标原点,以水平线为横坐标轴 x_3 、垂直线为纵坐标轴 y_3 ,构成 x_3y_3 坐标系。

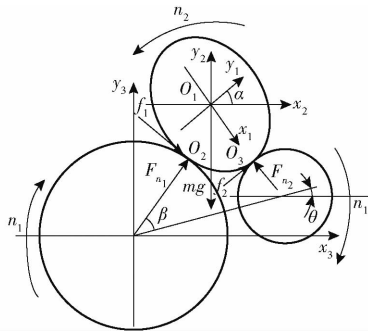


图 9 马铃薯坐标变换示意图

Fig. 9 Schematic of potato coordinate transformation

在 x_1y_1 坐标系中,马铃薯的近似椭圆方程式为

$$\frac{x_1^2}{a_1^2} + \frac{y_1^2}{a_2^2} = 1 \tag{1}$$

在 x_3y_3 坐标系中,去土辊 $F_1(x_3, y_3)$ 的方程式为

$$x_3^2 + y_3^2 = \left(\frac{d_1}{2}\right)^2 \tag{2}$$

在 x_3y_3 坐标系中,光辊 $F_2(x_3, y_3)$ 的方程式为

$$\left[x_3 - \left(\frac{d_1 + d_2}{2} + l \right) \cos \theta \right]^2 + \left[y_3 - \left(\frac{d_1 + d_2}{2} + l \right) \sin \theta \right]^2 = \left(\frac{d_2}{2} \right)^2 \tag{3}$$

对 x_1y_1 坐标系中椭圆的方程式进行旋转变换,变换到 x_2y_2 坐标系中,根据坐标系的旋转变换公式,椭圆的坐标为

$$\begin{cases} x_1 = x_2 \cos \alpha + y_2 \sin \alpha \\ y_1 = y_2 \cos \alpha - x_2 \sin \alpha \end{cases} \tag{4}$$

从而得到在 x_2y_2 坐标系中马铃薯的椭圆变换方程式

$$\frac{(x_2 \cos \alpha + y_2 \sin \alpha)^2}{a_1^2} + \frac{(y_2 \cos \alpha - x_2 \sin \alpha)^2}{a_2^2} = 1 \tag{5}$$

O_1 在 x_3y_3 坐标系中的坐标假设为 (x_0, y_0) ,坐标平移变换公式为

$$\begin{cases} x_3 = x_2 - x_0 \\ y_3 = y_2 - y_0 \end{cases} \tag{6}$$

假设在 x_3y_3 坐标系中椭圆的方程表达式为 $F_3(x_3, y_3)$,原椭圆方程式就变换为

$$\frac{[(x_3 + x_0) \cos \alpha + (y_3 + y_0) \sin \alpha]^2}{a_1^2} + \frac{[(y_3 + y_0) \cos \alpha - (x_3 + x_0) \sin \alpha]^2}{a_2^2} = 1 \tag{7}$$

由于在 x_3y_3 坐标系中,马铃薯的椭圆与去土辊的圆和光辊的圆相外切,即 $\begin{cases} F_1(x_3, y_3) \\ F_3(x_3, y_3) \end{cases}, \Delta = 0$ 时有唯一的公共解, $\begin{cases} F_2(x_3, y_3) \\ F_3(x_3, y_3) \end{cases}, \Delta = 0$ 时有唯一的公共解。

联立上述方程组,可以得到点 O_1 、 O_2 在 x_3y_3 坐标系中的相对坐标,分别为

$$\begin{cases} x_{o1} = \frac{a_1 + a_2 + d_1}{2 \sin \alpha} \sin(\alpha - \theta) \\ y_{o1} = \frac{2L \cos \theta}{a_1 + a_2 + d_1} \cos(\alpha + \theta) \\ x_{o2} = \frac{2d_2 l \cos \theta \cos(\alpha + \theta)}{\sqrt{(4l \cos \theta \cos(\alpha + \theta))^2 + (a_1 + a_2 + d_2)^4} \sin(\alpha - \theta)} \\ y_{o2} = \frac{a_1 + a_2 + d_2}{2} \cos(\alpha - \theta) \end{cases} \tag{8}$$

由直线的一般式 $y = kx + b$ 可以得到 F_{n2} 和 f_2 所在直线的公式

$$\begin{cases} y_1 = k_1 x_1 + b_1 \\ y_2 = k_2 x_2 + b_2 \end{cases} \tag{10}$$

由斜率公式 $k = \frac{y - y_1}{x - x_1}$ 得到斜率 k_1 、 k_2 分别为

$$k_1 = \frac{[(d_1 + d_2 + l) \sin \theta - (a_1 + a_2 + d_2) \cos(\alpha - \theta)] \sqrt{(4l \cos \theta \cos(\alpha + \theta))^2 + (a_1 + a_2 + d_2)^4 \sin(\alpha - \theta)}}{(d_1 + d_2 + l) \cos \theta \sqrt{(4l \cos \theta \cos(\alpha + \theta))^2 + (a_1 + a_2 + d_2)^4 \sin(\alpha - \theta)} - d_2 l \cos \theta \cos(\alpha + \theta)} \quad (11)$$

$$k_2 = \frac{(d_1 + d_2 + l) \cos \theta \sqrt{(4l \cos \theta \cos(\alpha + \theta))^2 + (a_1 + a_2 + d_2)^4 \sin(\alpha - \theta)} - d_2 l \cos \theta \cos(\alpha + \theta)}{[(d_1 + d_2 + l) \sin \theta - (a_1 + a_2 + d_2) \cos(\alpha - \theta)] \sqrt{(4l \cos \theta \cos(\alpha + \theta))^2 + (a_1 + a_2 + d_2)^4 \sin(\alpha - \theta)}} \quad (12)$$

其中 $b_1 = (d_1 + d_2 + l)(\sin \theta - k_1 \cos \theta)$ (13)

$$b_2 = y_{o_2} - k_2 x_{o_2} \quad (14)$$

式中 k_1 ——支持力 F_{n_2} 所在直线的斜率

k_2 ——摩擦力 f_2 所在直线的斜率

根据点到直线的距离公式,依次求得点 O_2 到 F_{n_2} 的距离 s_1 为

$$s_1 = \frac{|k_1 x_{o_1} - y_{o_1} + b_1|}{\sqrt{k_1^2 + 1}} \quad (15)$$

点 O_2 到 f_2 的距离 s_2 为

$$s_2 = \frac{|k_2 x_{o_1} - y_{o_1} + b_2|}{\sqrt{k_2^2 + 1}} \quad (16)$$

点 O_2 到 mg 的距离 s_3 为

$$s_3 = \frac{2L \cos \theta}{a_1 + a_2 + d_1} \cos(\alpha + \theta) - x_0 \quad (17)$$

由此得到合力矩为

$$\sum M = F_{n_2} s_1 + mgs_2 - f_2 s_3 \quad (18)$$

化简得

$$F_{n_2} [(a_1 + a_2 + d_1)^2 \sin(\alpha - \theta) + (d_2 + l)^2 \cos \theta] + mga_1 \sin \theta - f_2 la_2 \cos(\alpha + \theta) > 0 \quad (19)$$

由理论分析可知,在辊组式输送分离装置的去土作业过程中,马铃薯及其表面附着黏土主要受到去土辊和光辊支持力的作用、摩擦力的作用和自身重力的影响。支持力的大小主要受自身重力、马铃薯在输送分离装置的位置和装置倾角的影响,摩擦力是由支持力和摩擦因数决定的,摩擦因数受到去土辊和光辊自身材料的影响,根据合力矩公式可知当马铃薯的形状和马铃薯在输送分离装置的位置一定时,其力臂主要受到去土辊和光辊间距 l 、装置倾角 θ 、去土辊直径 d_1 和光辊直径 d_2 的影响,因此,在辊组式马铃薯收获机分离装置中,影响马铃薯去土质量的主要因素为去土辊和光辊直径 d_1 、 d_2 及其之间的间距 l ,还有装置倾角 θ 。在实际的马铃薯运动过程中,马铃薯之间的碰撞、马铃薯形状的不规则还有相邻马铃薯之间的碰撞等都是影响去土质量的因素,其实际运动过程较为复杂^[18-19]。

3.2 马铃薯表面黏结土壤分离技术分析

马铃薯收获的季节一般雨水较多,因此土壤里

水分较多,收获的马铃薯表面黏土较多,需要对马铃薯及其表面黏土的分离过程进行理论分析,以便对辊组式马铃薯收获机分离装置进行参数优化,得到最优的去土效果。本文通过莫尔-库伦理论,对马铃薯表面黏结土壤黏结力分析,得到薯土分离的条件,实现马铃薯表面黏结土壤的分离。将马铃薯与表面黏结土壤等效成一个圆形,由于黏结土壤分布在马铃薯表面,因此将表面黏结土壤等效成圆形下部分四分之一的弧形截面,并对其进行受力分析,其受力情况如图 10 所示,马铃薯与其表面黏结土壤受力包括自身重力,薯块与土壤之间的相互作用力 F_1 、 F_2 和黏结力 F_3 、 F_4 ,薯块受到其他薯块的作用力 F_5 ,土壤受到的支持力 F_{n_1} 。

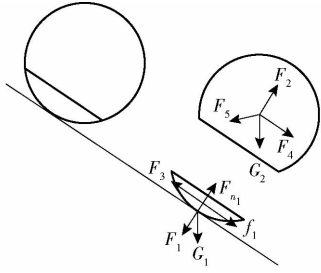


图 10 土块分离过程分析

Fig. 10 Analysis of soil block separation process

根据莫尔-库伦理论^[20](也称库伦强度理论),可知马铃薯表面黏结土壤的分离与破坏主要是受到作用于土壤的剪切应力,库伦通过土壤的破坏试验和对比各影响因素得出土壤破坏公式

$$\tau_t = \sigma \tan \varphi + C \quad (20)$$

式中 τ_t ——土壤抗剪强度, kPa

C ——土壤内聚力系数,取 0 ~ 25 kPa

φ ——土壤内摩擦角,取 $0^\circ \sim 37^\circ$

σ ——作用于土壤破坏面的法向应力, kPa

其中, σ 需要通过万能试验台进行计算和获取,其公式为

$$\sigma = \frac{p}{A} \quad (21)$$

式中 p ——压力 A ——接触面积

由上述理论可知,对马铃薯表面黏结土壤的破坏也就是克服土壤的黏结力,黏结力计算公式为

$$F_3 = \tau_t S \quad (22)$$

式中 S ——剪切作用面积

由受力情况可知,为使马铃薯表面所附着的泥土分离,需保证对土壤的破坏率大于土壤的黏结力,因此可以得到

$$f_3 + G_1 \sin\theta > F_3 \tag{23}$$

式中 f_3 ——马铃薯表面附着泥土所受的摩擦力
 G_1 ——马铃薯表面附着泥土所受的重力

土壤含水率也是影响黏结力的重要因素,经试验测定得到收获期马铃薯种植区土壤的含水率为 11% ~ 22%。根据黏结力的计算公式得到作用于土壤的平均剪切力为 8 000 kPa,由于马铃薯表面附着黏土在单位面积的数量不多,而且附着黏土的重力在单位面积上的大小为 300 kPa,因此重力在黏结力和摩擦力方向上的分力可以忽略不计。所以在上述公式中,当 f_3 满足单位面积上的力大于 0.8 N 时,马铃薯表面附着泥土可以被分离干净。摩擦力计算公式为

$$f_3 = \mu F_{n_1} \tag{24}$$

式中 μ ——去土辊与马铃薯表面附着泥土的摩擦因数,取 0.9

根据马铃薯与去土辊和光辊的受力分析可知

$$F_{n_1} = \frac{mg}{(1 - \mu) \cos(\theta + \beta) + (1 + \mu) \sin(\theta + \beta)} \tag{25}$$

由式(25)可知,马铃薯及其表面所附着泥土受到的摩擦力主要与装置倾角 θ 、去土辊和光辊间距 l 有关,另外还与马铃薯的尺寸有关,但是本文所取马铃薯大小为平均值,适应于大部分情况。且与马铃薯的重量成正比,与 $\theta + \beta$ 的正弦值、余弦值成反比,以薯块质量为 150 g、装置倾角为 0°、去土辊与光辊的最小间距为 13 mm 计算时,摩擦力最小值近似为 0.948 N,大于黏结力 0.8 N,因此能够去除马铃薯表面所附着的泥土,完成去土分离的作业,保证作业质量。因此,得到分离马铃薯表面附着泥土的影响因素:装置倾角和去土辊与光辊间距。另外,碰撞次数也是影响作业质量的重要因素,但碰撞次数与去土辊和光辊组数及转速有关,在一定范围内,碰撞次数与去土辊和光辊的组数及转速呈正相关关系。

综上所述,把去土辊与光辊间距 l 、装置倾角 θ 作为影响去土质量和伤薯率的试验因素,并进行试验分析,得到作业效果最佳的参数。

4 去土过程马铃薯碰撞分析

经研究显示,在马铃薯收获过程中,其机械损伤占马铃薯所有运输过程总损伤的 70%^[21],在输送分离装置中马铃薯损伤也属于机械损伤,因此,研究

马铃薯在输送分离装置碰撞损伤特性必不可少。

在上述分析中,得到辊组式马铃薯收获机分离装置的去土辊与光辊的间距和组数及排列方式、装置倾角对伤薯率和去土质量的影响较大,还缺少辊组式马铃薯收获机分离装置的转速对马铃薯的碰撞损伤分析,因此采用马铃薯碰撞检测系统设备对马铃薯的碰撞损伤进行辅助分析。设备主要包括计算机、碰撞检测球和数据线。以马铃薯碰撞检测球为试验手段,以输送分离装置的转速为试验因素,获取马铃薯在输送分离装置上的碰撞信息,找到碰撞损伤严重的区域,马铃薯碰撞检测系统及试验过程如图 11 所示。



图 11 马铃薯碰撞检测

Fig. 11 Potato collision detection

1. 总电源 2. 显示屏 3. 马铃薯碰撞球 4. 显示屏充电器

进行马铃薯输送分离装置碰撞试验时,去土辊和光辊选取不同的转速,即分别选取 70、82、100、118、130 r/min,选取的转速不能过小和过大,转速过小输送分离装置对马铃薯的运输过程受阻,会产生马铃薯堆积现象;转速过大时输送分离装置去土效果不明显,因此选用 5 个不同转速。试验时,提前将马铃薯碰撞检测球放在输送分离装置的上方,事先准备好秒表计时,进行试验时,利用秒表同步记录马铃薯运动的各个关键位置,计算机同步实时反映马铃薯碰撞特征。试验完成后,将马铃薯检测球取出,并对检测球采集到的碰撞信息进行数据统计分析,统计结果如表 3 所示。

表 3 碰撞特征统计结果

Tab. 3 Statistics of collision characteristics

输送分离装置转速/(r·min ⁻¹)	碰撞次数	碰撞加速度/(m·s ⁻²)	碰撞持续时间/s
130	7	23.8	5.8
118	9	20.6	6.5
100	11	15.2	7.4
82	14	12.5	9.2
70	17	10.7	10.4

由表 3 可知,马铃薯检测球在输送分离装置不同的转速下,碰撞次数、碰撞加速度和碰撞持续时间

不同。输送分离装置光辊和去土辊的转速越大,碰撞次数越少,伤薯率越低,但去土效果越差,在转速为 100 r/min 时,碰撞次数和碰撞加速度较为适中,其薯块碰撞特征图如图 12 所示。由此可知输送分离装置光辊和去土辊转速 n 也是影响指标的重要因素。

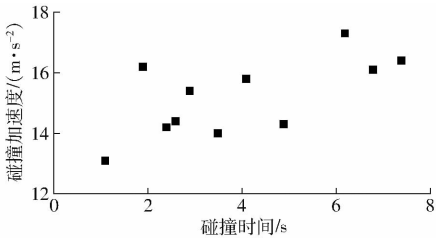


图 12 薯块碰撞特征图

Fig. 12 Characteristic diagram of potato block collision

5 试验

5.1 试验材料与装置

由于前端升运链分离装置后的马铃薯在收集过程中损害大,造成台架试验无法精确模拟田间试验的工况,试验结果不精确。因此本文将试验分为装置仿真试验和样机田间试验,两者互相验证,使试验效果更加精确。仿真试验于 2021 年 6 月在实验室完成,试验田试验于 2021 年 7 月进行,试验地点在青岛农业大学胶州马铃薯种植基地。试验时输送分离装置安装在马铃薯联合收获机上,马铃薯联合收获机环形提升装置在收获过程中不工作,捡拾试验后的马铃薯才开始工作。马铃薯品种为荷兰 17,试验田中按照五点取样法随机抽取 5 个 1 m × 1 m 的地块挖掘马铃薯,挖掘时注意轻挖轻放,挖掘后观察其有无受伤,结果发现马铃薯均无内部损伤和外部损伤,且马铃薯直径在 32 ~ 75 mm 之间,长轴长度在 33 ~ 140 mm 之间,马铃薯的形状指数为 0.69,质量在 102 ~ 420 g 之间,土壤含水率为 19.2%^[22],试验时物料中含有薯秧、土块等杂质。马铃薯收获机输送分离装置田间试验过程和试验后马铃薯状态如图 13 所示。



图 13 马铃薯联合收获机样机试验过程和马铃薯状态
Fig. 13 Test process of potato combine harvester prototype

5.2 试验因素和评价指标

根据马铃薯在装置上的动力学分析和马铃薯表面附着泥土分离分析,确定输送分离装置转速 n 、去

土辊与光辊间距 l 、装置倾角 θ 为试验因素。
根据 NY/T 648—2015《马铃薯收获机质量评价技术规范》将伤薯率 e_1 和去土效率 e_2 作为试验的评价指标,具体公式为

$$e_1 = \frac{M_1}{M_2} \times 100\% \quad (26)$$

$$e_2 = \frac{M_1}{M_2 + m} \times 100\% \quad (27)$$

式中 M_1 ——作业后损伤的马铃薯总质量
 M_2 ——作业后马铃薯总质量
 m ——土壤质量

5.2.1 试验方案与结果

采用二次旋转正交组合试验,结合国内外相关输送分离装置的作业参数和样机实际的作业工况,确定各试验因素的范围为:去土辊与光辊间距 13 ~ 20 mm、装置倾角 5° ~ 11°、去土辊和光辊转速 70 ~ 130 r/min^[23]。

进行试验时,严格控制马铃薯收获机的挖掘深度和拖拉机的前进速度,避免因挖掘过深和前进过快造成马铃薯在输送分离装置上堆积,从而影响各试验因素显著性。各因素的调节过程如下:通过控制四杆支撑结构的角度和位置来调节输送分离装置的倾角和去土辊与光辊的间距;通过节流阀调节液压马达的流量来调节去土辊和光辊的转速。

运用数据处理软件对影响试验结果的指标进行显著性分析,得到合适的各因素组合。试验因素编码如表 4 所示,试验方案及结果如表 5 所示。

表 4 试验因素编码

Tab. 4 Experimental factors and codes

编码	因素		
	去土辊与光辊 间距 X_1 /mm	装置倾角 $X_2/(^\circ)$	去土辊和光辊转速 $X_3/(r \cdot \min^{-1})$
1.682	20.0	11.0	130.0
1	18.6	9.8	118.0
0	16.5	8.0	100.0
-1	14.4	6.2	82.0
-1.682	13.0	5.0	70.0

5.2.2 试验结果分析

采用 Design-Expert 11.0 软件,对试验数据进行二次回归分析和多元回归拟合^[24-25],得到伤薯率 e_1 和去土率 e_2 的回归方程,最后检验各试验因素的显著性。

(1) 马铃薯伤薯率分析

马铃薯伤薯率方差分析如表 6 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 对马铃薯伤薯率的影响极显著 ($P < 0.01$); $X_1 X_2$ 对马铃薯伤薯率的影响显著,其余试验因素对马铃

表 5 试验方案与结果

Tab. 5 Test plan and experimental results

序号	因素			伤薯率	去土率
	X_1/mm	$X_2/(\text{^\circ})$	$X_3/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$e_1/\%$	$e_2/\%$
1	14. 4	6. 2	82. 0	0. 54	93. 9
2	18. 6	6. 2	82. 0	0. 62	95. 1
3	14. 4	9. 8	82. 0	0. 52	93. 7
4	18. 6	9. 8	82. 0	0. 97	94. 8
5	14. 4	6. 2	118. 0	0. 92	94. 9
6	18. 6	6. 2	118. 0	1. 04	96. 2
7	14. 4	9. 8	118. 0	0. 95	94. 6
8	18. 6	9. 8	118. 0	1. 15	97. 1
9	13. 0	8. 0	100. 0	0. 57	93. 9
10	20. 0	8. 0	100. 0	0. 86	96. 5
11	16. 5	5. 0	100. 0	0. 69	95. 9
12	16. 5	11. 0	100. 0	0. 95	95. 1
13	16. 5	8. 0	70. 0	0. 57	94. 4
14	16. 5	8. 0	130. 0	1. 19	95. 6
15	16. 5	8. 0	100. 0	0. 98	96. 2
16	16. 5	8. 0	100. 0	1. 01	96. 4
17	16. 5	8. 0	100. 0	1. 09	96. 6
18	16. 5	8. 0	100. 0	0. 94	95. 7
19	16. 5	8. 0	100. 0	0. 96	96. 3
20	16. 5	8. 0	100. 0	0. 89	96. 1
21	16. 5	8. 0	100. 0	1. 01	96. 4
22	16. 5	8. 0	100. 0	0. 93	96. 2
23	16. 5	8. 0	100. 0	1. 05	96. 5

表 6 马铃薯伤薯率方差分析

Tab. 6 Analysis of variance of potato injury rate

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	0. 832 2	9	0. 092 5	23. 25	<0. 000 1 ***
X_1	0. 131 1	1	0. 131 1	32. 97	<0. 000 1 ***
X_2	0. 060 2	1	0. 060 2	15. 14	0. 001 9 ***
X_3	0. 440 4	1	0. 440 4	110. 73	<0. 000 1 ***
X_1X_2	0. 025 3	1	0. 025 3	6. 36	0. 025 5 **
X_1X_3	0. 005 5	1	0. 005 5	1. 39	0. 260 2
X_2X_3	0. 004 5	1	0. 004 5	1. 13	0. 306 2
X_1^2	0. 116 3	1	0. 116 3	29. 24	0. 000 1 ***
X_2^2	0. 037 0	1	0. 037 0	9. 32	0. 009 3 ***
X_3^2	0. 011 6	1	0. 011 6	2. 91	0. 111 7
残差	0. 051 7	13	0. 004 0		
失拟差	0. 020 5	5	0. 004 1	1. 05	0. 451 8
总和	0. 883 9	22			

注：*** 表示极显著 ($P < 0.01$)，** 表示显著 ($0.01 \leq P \leq 0.05$)，下同。

薯伤薯率的影响不显著,将不显著的交互作用项的回归平方及自由度并入残差项,由此得到各试验因素对马铃薯伤薯率的回归方程为

$$e_1 = -5.465\,58 + 0.577\,316X_1 + 0.334\,62X_2 + 0.010\,014X_3 + 0.014\,881X_1X_2 - 0.019\,683X_1^2 - 0.015\,123X_2^2$$

(28)

对回归方程进行失拟试验,如表 6 所示,失拟差 $P = 0.451\,8 > 0.1$,失拟差不显著,说明上述回归方程对马铃薯伤薯率的模拟较好,无影响马铃薯伤薯率的其他因素。由此可知,回归方程的二次关系显著,分析结果合理。

(2) 马铃薯去土率分析

马铃薯伤薯率方差分析如表 7 所示, X_1 、 X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 对马铃薯去土率的影响极显著; X_2 对马铃薯去土率的影响显著;其余试验因素对马铃薯去土率试验的影响不显著。将不显著的交互作用项的回归平方及自由度并入残差项。由此得到各试验因素对马铃薯去土率的回归方程为

$$e_2 = 57.965\,76 + 2.613\,43X_1 + 0.471\,217X_2 + 0.211\,059X_3 - 0.092\,038X_1^2 - 0.093\,608X_2^2 - 0.001\,492X_3^2$$

(29)

对回归方程进行失拟试验,如表 7 所示,失拟差 $P = 0.158\,8 > 0.1$,失拟差不显著,说明上述回归方程对马铃薯去土率的模拟较好,无影响马铃薯去土率的其他因素。由此可知,回归方程的二次关系显著,分析结果合理。

表 7 马铃薯去土率方差分析

Tab. 7 Variance analysis of potato soil removal rate

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	20. 17	9	2. 24	21. 54	<0. 000 1 ***
X_1	8. 03	1	8. 03	77. 18	<0. 000 1 ***
X_2	0. 103 3	1	0. 103 3	0. 99	0. 033 7 **
X_3	3. 88	1	3. 88	37. 27	<0. 000 1 ***
X_1X_2	0. 137 8	1	0. 137 8	1. 32	0. 270 5
X_1X_3	0. 300 3	1	0. 300 3	2. 89	0. 113 1
X_2X_3	0. 137 8	1	0. 137 8	1. 32	0. 270 5
X_1^2	2. 54	1	2. 54	24. 45	0. 000 3 ***
X_2^2	1. 42	1	1. 42	13. 65	0. 002 7 ***
X_3^2	3. 61	1	3. 61	34. 67	<0. 000 1 ***
残差	1. 35	13	0. 104 0		
失拟差	0. 777 4	5	0. 155 5	2. 16	0. 158 8
总和	21. 52	22			

5.2.3 试验结果分析

运用 Design-Expert 11.0 软件,可得到输送分离装置中去土辊和光辊间距、装置倾角、去土辊和光辊转速的交互作用对伤薯率和去土率两个试验指标影响的响应曲面。去土辊和光辊间距及去土辊和光辊转速对试验指标的影响最大,应作为变量,考虑实际情况:马铃薯收获过程中对装置倾角的改变相比于去土辊和光辊的转速较为麻烦。因此本文以去土辊和光辊间距、装置倾角作为横轴,改变去土辊和光辊转速,观察响应曲面的变化,如图 14 所示。

如图 14a ~ 14d 所示,当装置倾角和去土辊和光

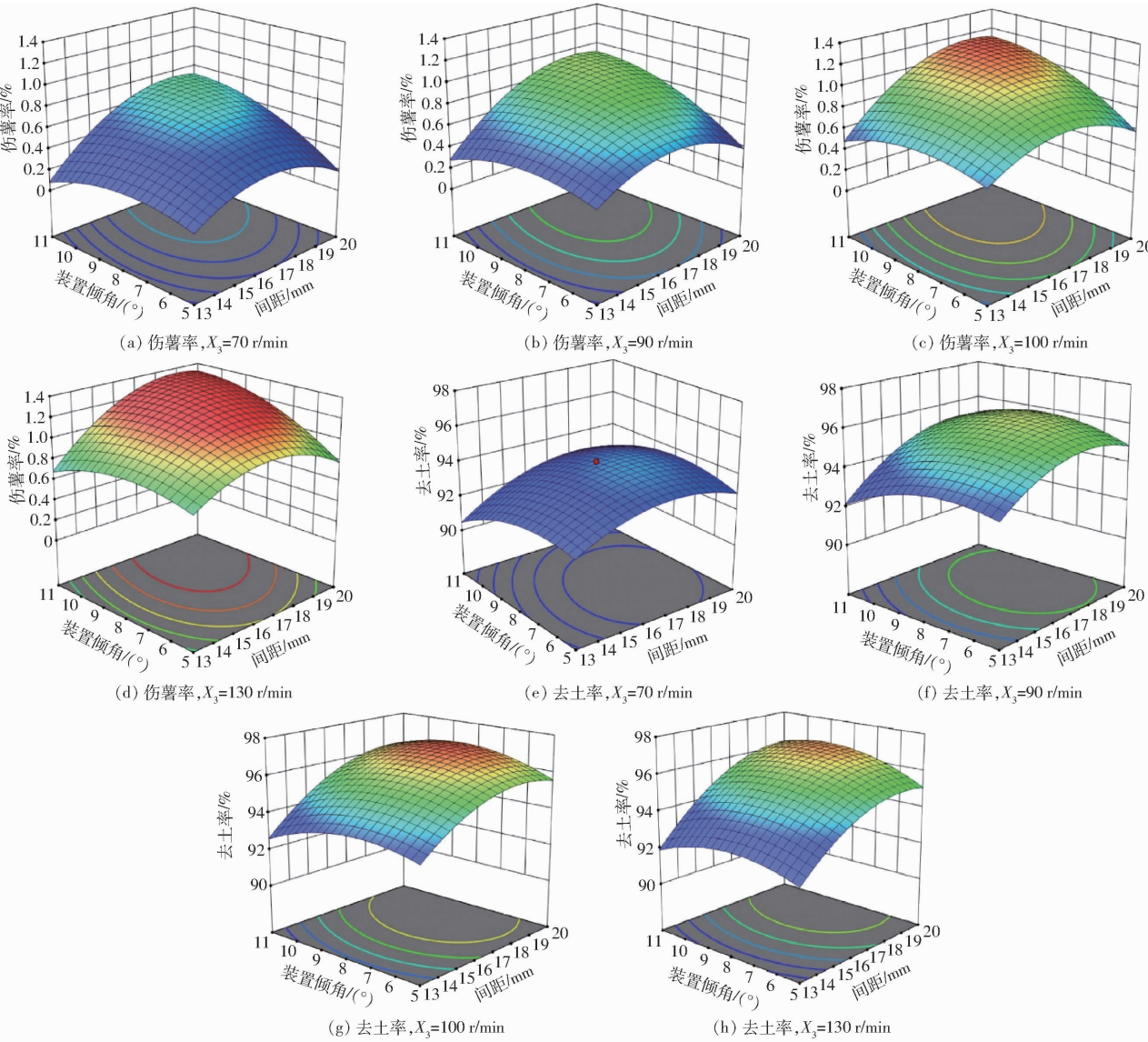


图 14 因素交互作用对伤薯率和去土率影响的响应曲面

Fig. 14 Response surfaces affected by two factors of damaged potato rate and soil removal rate

辊间距不变,去土辊和光辊转速由 70 r/min 上升到 130 r/min 时,马铃薯伤薯率有增大的趋势;当去土辊和光辊转速和间距一定时,马铃薯伤薯率随着装置倾角的增大呈增大的趋势,最优范围为 7.5°~9.5°;当去土辊和光辊转速和装置倾角一定时,马铃薯伤薯率随着去土辊和光辊间距的增大呈增大的趋势,最优范围为 14~17 mm。其中去土辊和光辊间距是影响伤薯率最主要的因素。

如图 14e~14h 所示,当装置倾角、去土辊和光辊间距不变,去土辊和光辊转速由 70 r/min 上升到 130 r/min 时,马铃薯去土率有先增大后减小的趋势,且减小幅度不明显;在去土辊和光辊转速 90 r/min 时达到顶峰。当去土辊和光辊转速和间距一定时,马铃薯去土率随着装置倾角的增大呈先增大后减小的趋势,最优范围为 7.8°~9.4°;当去土辊和光辊转速和装置倾角一定时,马铃薯去土率随

着去土辊和光辊间距的增大呈先增大后减小的趋势,最优范围为 13.8~16.8 mm,且减小幅度不明显。其中去土辊和光辊转速是影响伤薯率最主要的因素,最优范围为 95.6~108.3 r/min。

5.2.4 参数优化

利用 Matlab 软件中的优化模块对去土辊和光辊间距和转速及装置倾角 3 个回归模型进行求解。优化原理利用最大最小值原理,将回归方程代入目标函数,根据 NY/T 648—2015《马铃薯收获机质量评价技术规范》的相关要求,选择优化目标函数与约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \max Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t. } \begin{cases} 13.8 \text{ mm} \leq X_1 \leq 16.8 \text{ mm} \\ 7.5^\circ \leq X_2 \leq 9.5^\circ \\ 95.6 \text{ r/min} \leq X_3 \leq 108.3 \text{ r/min} \end{cases} \end{cases} \quad (30)$$

通过优化求解,得到去土辊与光辊间距为 15.4~

16.7 mm、装置倾角为 7.8°~8.6°、去土辊与光辊转速为 97.4~106.3 r/min 时,输送分离装置作业去土效果最佳,伤薯率为 0.71%~0.82%,去土率为 97.8%~98.2%。

5.3 田间试验验证

以马铃薯收获机输送分离装置作业过程的伤薯率和去土率为试验指标,进行辊组式马铃薯收获机输送分离装置与普通马铃薯收获机分离装置对比试验。试验选取辊组式马铃薯收获机输送分离装置去土辊和光辊间距为 16.5 mm,装置倾角为 8°,去土辊转速为 100 r/min,光辊转速为 100 r/min,普通马铃薯收获机分离装置链条间距 17.8 mm,装置倾角 16°,链条转速 110 r/min。田间试验验证的测试方法与 5.2.1 节的测试方法一致。试验结果如表 8 所示。

表 8 对比试验结果
Tab.8 Comparison test results %

序号	传统分离装置		优化后输送分离装置	
	伤薯率	去土率	伤薯率	去土率
1	0.77	94.1	0.64	97.1
2	0.76	94.6	0.66	96.9
3	0.78	94.5	0.65	96.1
4	0.81	94.8	0.64	97.4
5	0.79	94.3	0.68	97.8
6	0.74	94.0	0.62	96.9
7	0.75	95.1	0.61	96.8
8	0.71	94.8	0.59	97.6
9	0.76	94.3	0.64	97.3
10	0.72	94.1	0.66	97.2
平均值	0.76	94.5	0.64	97.1

由表 8 可知,传统分离装置平均伤薯率为 0.76%,输送分离装置平均伤薯率为 0.64%,伤薯率降低 0.12 个百分点。传统分离装置平均去土率为 94.5%,输送分离装置平均去土率为 97.1%,去土率提高 2.6 个百分点。

6 结论

(1)针对传统输送分离装置伤薯率高、去土率低的问题,通过对橡胶、聚氨酯材料的比对等,设计了一种聚氨酯材料的辊组式马铃薯收获机输送分离装置,提出了去土辊与光辊交替排列的排列方式。

(2)对马铃薯收获机输送分离装置的去土过程进行了动力学分析,利用莫尔-库伦定律对马铃薯与黏土的分离过程进行了分析,通过马铃薯碰撞检测系统对马铃薯的碰撞过程进行辅助分析,得到了影响去土率和伤薯率的主要试验因素:去土辊和光辊的间距与转速、装置倾角。对马铃薯收获机输送分离装置进行了仿真试验和田间试验,对工作参数进行了优化,有效提高了作业质量。

(3)通过辊组式马铃薯收获机输送分离装置的试验,建立了去土辊和光辊的间距、转速和装置倾角与伤薯率和去土率间的回归模型,并对其进行了优化。试验表明去土辊和光辊间距为 16.5 mm,装置倾角为 8°,去土辊转速为 100 r/min,光辊转速为 100 r/min 时,比传统分离装置伤薯率降低 0.12 个百分点,去土率提高 2.6 个百分点,能较好地满足实际去土作业要求。

参 考 文 献

[1] 张兆国,王海翼,李彦彬,等. 多级分离缓冲马铃薯收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(2):96-109.
ZHANG Zhaoguo, WANG Haiyi, LI Yanbin, et al. Design and experiment of multistage separation buffer potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(2): 96-109. (in Chinese)

[2] 杨红光,谢焕雄,颜建春,等. 马铃薯采后机械化清洗技术综述[J]. 中国农机化学报,2020,41(3):115-120.
YANG Hongguang, XIE Huanxiong, YAN Jianchun, et al. Overview of mechanized cleaning technology of post-harvest potato [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020,41(3): 115-120. (in Chinese)

[3] 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 4M-2 potato combine harvester[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2008. (in Chinese)

[4] 吴清分. Grimme 公司 GT170 系列牵引式马铃薯收获机[J]. 农业工程,2015,5(3):161-164.
WU Qingfen. GT170 series traction potato harvester of Grimme company[J]. Agricultural Engineering, 2015,5(3): 161-164. (in Chinese)

[5] EL-GENDY S L A, MORAD M M, EL-SHAL H M. Comparative study between some different potato harvesting machines in small holdings[J]. Zagazig Journal of Agricultural Research,2015,12(4):148-153.

[6] MOSALANEJAD H, MOBLI H, POURSOLTAN A. The main parameters assessment of clod and stone separation from potato crop (inclined belt type) in potato harvester[J]. Majlesi Journal of Mechanical Engineering,2011(2):79-84.

[7] 魏忠彩,李洪文,孙传祝,等. 基于多段分离工艺的马铃薯联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(1):129-140,112.
WEI Zhongcai, LI Hongwen, SUN Chuanzhu, et al. Design and experiment of potato combined harvester based on multi-stage separation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(1): 129-140,112. (in

Chinese)

- [8] 张恒. 马铃薯干式低损清选分级机设计与清选试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2018.
ZHANG Heng. Design and cleaning test of dry and low damage sorting machine for potato[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [9] 王相友, 孙景彬, 许英超, 等. 拨辊推送式马铃薯清选分选机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 316–322, 279.
WANG Xiangyou, SUN Jingbin, XU Yingchao, et al. Design and experiment of potato cleaning and sorting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 316–322, 279. (in Chinese)
- [10] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 119–126. (in Chinese)
- [11] 胡奔. 马铃薯跌落损伤机理与防损伤装置研究[D]. 成都: 西华大学, 2018.
HU Ben. Study on potato dropping damage mechanism and damage-proof device[D]. Chengdu: Xihua University, 2018. (in Chinese)
- [12] 卢琦. 马铃薯损伤机理试验研究及联合收获机设计[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
LU Qi. Experimental research on damage mechanism of potato and combine harvester design[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [13] 申屠留芳, 韦奇, 巩尊国, 等. 马铃薯分选机的设计[J]. 农机化研究, 2014, 36(8): 114–117.
SHENTU Liufang, WEI Qi, GONG Zunguo, et al. Design of potato sorter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(8): 114–117. (in Chinese)
- [14] ZHOU K, JENSEN A L, BOCHTIS D D. Simulation model for the sequential in-field machinery operations in a potato production system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 116(8): 173–186.
- [15] 谢胜仕, 王春光, 邓伟刚. 马铃薯碰撞损伤试验与碰撞加速度特性分析[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(1): 163–169.
XIE Shengshi, WANG Chunguang, DENG Weigang. Collision damage test and acceleration characteristic analysis of potato[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(1): 163–169. (in Chinese)
- [16] 吕金庆, 杨晓涵, 吕伊宁, 等. 马铃薯挖掘机升运分离过程块茎损伤机理分析与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 103–113.
LÜ Jinqing, YANG Xiaohan, LÜ Yining, et al. Analysis and experiment of potato damage in process of lifting and separating potato excavator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 103–113. (in Chinese)
- [17] 孙军, 于文强, 李学强, 等. 马铃薯分选输送线静力学分析与计算方法[J]. 食品与机械, 2015, 31(5): 89–92.
SUN Jun, YU Wenqiang, LI Xueqiang, et al. Analysis and calculation method of potato sorting conveyor line statics[J]. Food and Machinery, 2015, 31(5): 89–92. (in Chinese)
- [18] 魏忠彩, 李学强, 孙传祝, 等. 马铃薯收获与清选分级机械化伤薯因素分析[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(8): 63–70.
WEI Zhongcai, LI Xueqiang, SUN Chuazhu, et al. Analysis of potato mechanical damage in harvesting and cleaning and sorting storage[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(8): 63–70. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 李建. 马铃薯收获机薯土分离筛分性能研究与优化设计[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
LI Jian. Study and optimum design on separation and screening performance of potato and soil of potato harvester[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [21] 魏忠彩, 李洪文, 苏国梁, 等. 缓冲筛式薯杂分离马铃薯收获机研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 1–11.
WEI Zhongcai, LI Hongwen, SU Guoliang, et al. Development of potato harvester with buffer type potato-impurity separation sieve[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 1–11. (in Chinese)
- [22] 田悦, 赵萍, 李永奎, 等. 五种早熟马铃薯的物理参数测试与分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(6): 737–744.
TIAN Yue, ZHAO Ping, LI Yongkui, et al. Measurement and analysis of physical parameters of five early maturing potato varieties[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(6): 737–744. (in Chinese)
- [23] 纪晓磊, 于文强, 吴峰倩. 马铃薯清选机关键工作参数的优化分析[J]. 农机化研究, 2018, 40(11): 23–27, 32.
JI Xiaolei, YU Wenqiang, WU Fengqian. Optimization analysis of the key working parameters of potato cleaner machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(11): 23–27, 32. (in Chinese)
- [24] 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.
- [25] 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.