doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.03.022

马铃薯收获减损机理研究试验台设计与优化

柳才朝　顾　满　吴　峰　顾峰玮　罗伟文　胡志超　王　冰
（农业农村部南京农业机械化研究所，南京 210014）

摘要：为深入研究马铃薯收获薯土分离装置的作业机理和作业质量提升技术途径，解决马铃薯收获机械田间试验伤薯率及破皮率高、效率低、数据采集不便等问题，设计了一款马铃薯收获减损规律试验台。该试验台主要由分离装置、振频调整装置、振幅调整装置、倾角调整装置、物料监测装置、全角度观测装置等组成，试验台采用可视化设计，可全方位观察分离过程。通过理论分析建立了薯土混合物在输送分离过程中的动力学模型；运用高速摄影技术解析了薯土碰撞、翻滚回流和破裂等力学行为的发生与演变过程，通过曲线拟合，获得薯土混合物的速度曲线和加速度曲线。通过单因素试验分析，明确了主要作业参数：线速度、装置倾角、振动频率、振幅的影响区间，并开展响应面试验寻找最优作业参数。结果表明：当线速度为 1.2 m/s、装置倾角为 20°、振动频率为 12.5 Hz、振幅为 50 mm 时，马铃薯伤薯率为 0.81%，破皮率为 1.36%，含杂率为 2.256%，各项作业指标均满足马铃薯机械化收获作业要求，可为马铃薯低损高效收获装备的设计与优化提供理论依据和技术支撑。

关键词：马铃薯收获；试验台；减损机理；高速摄影；参数优化
中图分类号：S225.7　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)03-0228-11　　**OSID**：

Design and Optimization of Test Bench for Studying Mechanism of Loss Reduction in Potato Harvesting

LIU Caichao　GU Man　WU Feng　GU Fengwei　LUO Weiwen　HU Zhichao　WANG Bing
(*Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Nanjing* 210014, *China*)

Abstract: Aiming to deeply study the working mechanism and the technical approaches for improving the working quality of the potato soil separation device during harvesting, and solve the problems of high injury rate and skin breakage rate, low efficiency and inconvenient data collection in field tests of potato harvesting machinery, a potato harvesting loss reduction rule test bench was designed. The test bench mainly consisted of a separation device, a vibration frequency adjustment device, an amplitude adjustment device, an angle adjustment device, a material monitoring device, and a full-angle observation device. The test bench adopted a visual design, allowing for all-round observation of the separation process. Through theoretical analysis, a dynamic model of the potato-soil mixture during the conveying and separation process was established. High-speed photography technology was used to analyze the occurrence and evolution of mechanical behaviors such as potato-soil collision, rolling backflow, and rupture. Through curve fitting, the velocity and acceleration curves of the potato-soil mixture were obtained. Through single-factor experiments, the influence intervals of the main working parameters, including linear velocity, device angle, vibration frequency, and amplitude, were clarified. Response surface experiments were conducted to find the optimal working parameters. The results showed that when the linear velocity was 1.2 m/s, the device angle was 20°, the vibration frequency was 12.5 Hz, and the amplitude was 50 mm, the injury rate of potatoes was 0.81%, the skin breakage rate was 1.36%, and the impurity rate was 2.256%. All working indicators met the requirements of potato mechanical harvesting operations, providing theoretical basis and technical support for the design and optimization of low-loss and high-efficiency potato harvesting equipment.

Key words: potato harvesting; test bench; loss reduction mechanism; high-speed photography; parameter optimization

收稿日期：2025-07-25　修回日期：2025-08-31
基金项目：中国博士后科学基金项目(2024T170443、2023M731824)和中国农业科学院创新工程项目
作者简介：柳才朝(1999—)，男，助理工程师，主要从事农业机械化及其自动化研究，E-mail：9193011913@njau.edu.cn
通信作者：王冰(1984—)，男，研究员，博士，主要从事农业装备工程技术研究，E-mail：wangbing@caas.cn

0　引言

随着农业现代化进程加速推进，马铃薯生产全程机械化已成为产业可持续发展的核心驱动力[1-2]。其中收获环节的作业质量直接决定薯块品质、贮藏性能和经济效益[3-4]。然而，机械化收获过程中普遍存在的伤薯率、破皮率及含杂率高等问题，已成为制约产业效益提升和机械化技术推广应用的“卡脖子”难题。

在收获机械作业链中，薯土分离装置是影响伤薯率、破皮率和含杂率的核心部件[5-6]，其作业性能优劣直接决定最终收获的减损效果，国内外学者及企业开展了广泛研究。魏忠彩等[7]研究了多种薯土分离技术并应用在马铃薯收获机上，达到低损高效分离的效果。杨然兵等[8]设计辊组式、拨辊推送式、立式环形等马铃薯收获装备，作业时收获机伤薯率低、去土率高。杨德秋等[9-10]研制马铃薯捡拾装袋机，捡拾效果优异。吕金庆等[11-12]结合土壤与分离杆条之间的交互作用关系，对分离机构结构参数和工作参数进行优化设计。国内希森天成、中机美诺、青岛洪珠等农机企业研发多类马铃薯收获机，应用广泛[13]。德国 GRIMME、比利时 Dewulf、美国 Advanced Farm Equipment 等企业研制马铃薯联合收获机，薯土分离效果明显[14]。分析可知，分离机构是马铃薯联合收获机的核心技术，是造成马铃薯损伤的主要来源。因此开展薯土混合物在分离装置上的动力学行为及其与关键作业机构参数的内在作用机理研究对提升马铃薯收获机综合性能有重要意义。

本研究设计一套多参数可调、过程可视化的马铃薯收获减损机理研究试验台。利用薯土混合物输送分离过程的动力学建模与高速摄影技术，阐明薯块间碰撞、翻滚回流及土块破裂等关键力学行为的演化机制、特征规律及影响因素。通过单因素试验确定分离装置作业参数的有效作业区间；进而开展多因素响应面优化试验，得出最优参数组合并进行试验验证。

1　试验台结构与工作原理

1.1　试验台整体结构

马铃薯收获减损机理试验台主要由支撑机架、分离装置、振频调整装置、振幅调整装置、倾角调整装置、物料监测装置、全角度观测装置、交流电动机、箱体固定机架、斜齿轮减速机等组成，如图 1 所示。试验台安装复合透明板材，从侧面观看薯块分离过程，侧板后端预留安装位置，可调整分离筛长度。试验台整机技术参数如表 1 所示。

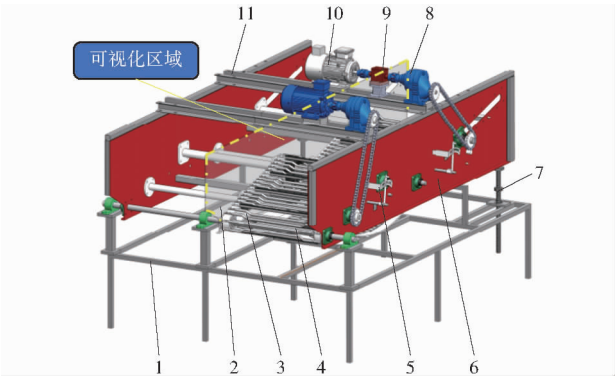

图 1　试验台结构图

Fig. 1　Structure diagram of test bench

1. 支撑机架　2. 全角度观测装置　3. 振频调整装置　4. 分离装置　5. 振幅调整装置　6. 侧板　7. 倾角调整装置　8. 斜齿轮减速机　9. 物料监测装置　10. 交流电动机　11. 箱体固定架

表 1　试验台整机技术参数

Tab. 1　Technical parameters of test bench

参数	数值/型式
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 800×1 800×1 500
整机质量/kg	≤500
喂入方式	输送带喂入
分离筛长度/mm	4 800～5 600
作业幅宽/mm	1 000
振幅调节范围/mm	0～70
振动频率调节范围/Hz	5～15
线速度调节范围/(m·s^{-1})	0.5～2.0
倾角调节范围/(°)	15～35
扭矩传感器量程/(N·m)	0～200

1.2　试验台工作原理

试验台工作原理如图 2 所示。试验台工作时，人工将薯土混合物料铺放至传送带，由传送带将其输送至分离筛。分离筛由电动机驱动，两级分离筛均配备振动轮，由电机驱动进行抖动碎土。振幅装置安装于未布置高速摄影机的侧板一面，由人工根

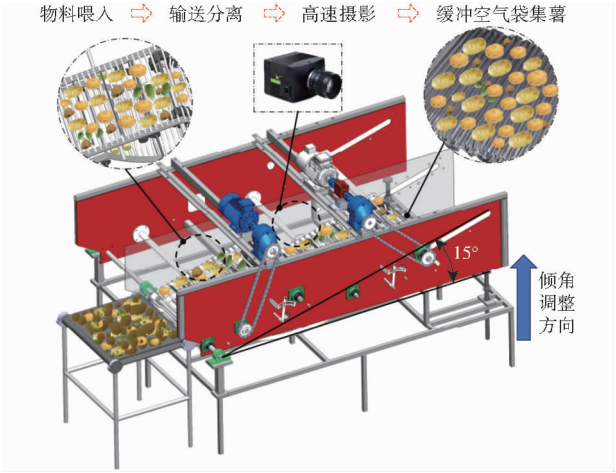

图 2　试验台工作原理图

Fig. 2　Working principle diagram of test bench

据试验需求手动调节。倾角调整机构采用滚珠丝杠,通过滚珠丝杠驱动输送分离装置绕前支撑轴逐渐抬升,可按试验要求精确调整至所需角度。试验后由缓冲气柱袋收集马铃薯。

1.3 输送分离装置结构

薯土混合物在分离筛面上经历输送、碰撞和挤压等动力学过程,将细粒土壤组分逐步分离,马铃薯块茎与较大尺寸土块则持续向后输送。如图 3 所示,分离装置主要由分离筛、导向轮、前定轮、橡胶驱动轮、振动轮、振幅调整手柄、分离筛驱动轴、振幅调整胶轮、托轮、连接盘等组成。分离筛采用多根横向平行排列的杆条结构,为降低块茎与杆条接触引发的机械损伤,杆条外表面包裹柔性橡胶层。

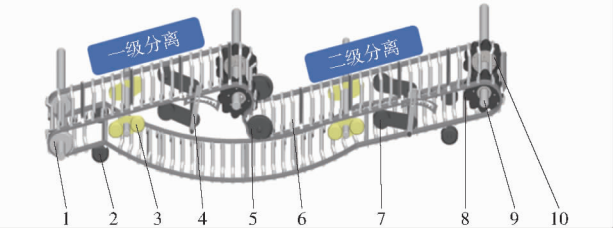

图 3 试验台输送分离装置

Fig. 3 Test bench conveying and separation device

1. 支撑滚筒 2. 托轮 3. 振动轮 4. 振幅调整手柄 5. 导向轮 6. 分离筛 7. 振幅调整胶轮 8. 橡胶驱动轮 9. 主驱动轴 10. 连接盘

1.4 试验台调控系统

试验台调控系统主要由电气控制箱、便捷式计算机、扭矩传感器、485 转换器、变频器、输送带控制仪、高速摄影机等组成,如图 4 所示。其中,扭矩传感器采用大洋传感器系统工程有限公司生产的高精度动态扭矩传感器,支持 RS485 通信,电源采用直流 24 V,脉冲 120 Hz/r,测量行程 0 ~ 200 N·m。输送带控制仪的调速范围为 0.5 ~ 1.5 m/s。变频器为 2 个,2.2 kW 变频器控制分离筛线速度,1.1 kW 变频器控制振动轮转速。

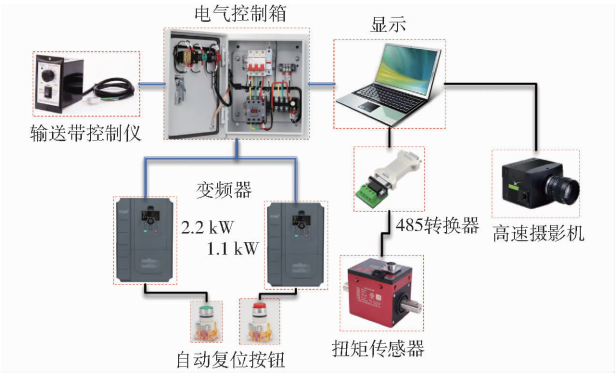

图 4 试验台调控系统构成图

Fig. 4 Composition diagram of test bench measurement and control system

2 薯土混合物分离机理分析

2.1 薯土混合物分离特性

马铃薯在分离输送带上的减损效果与振动参数密切相关。振动装置的胶轮在电机驱动下绕中心轴做旋转运动,进而间歇性顶起分离筛产生抖动作用,实现筛面振动清土。分离筛面在橡胶驱动辊周期性作用下,构成一个近似简谐运动的振动系统[15],完成对薯土混合物的输送、破碎、分离等作业,如图 5 所示。将分离筛初始斜向上的平面为参考平面,垂直于分离筛斜面的方向为 Y 轴正方向,进行分析可得振动轮顶起分离筛时产生的势能 E_p 和动能 E_k 为

$$\begin{cases} E_p = \dfrac{1}{2} m\theta^2 A^2 \cos^2(\theta t + \beta) \\ E_k = \dfrac{1}{2} m\theta^2 A^2 \sin^2(\theta t + \beta) \end{cases} \tag{1}$$

式中 A——分离筛随振动轮上下运动的振幅,mm

β——分离筛做简谐运动的初始相位,(°)

θ——振动轮角速度,rad/s

t——分离筛工作时振动时间,s

m——分离筛工作时处于分离筛筛面薯土混合物的质量,kg

将势能 E_p 和动能 E_k 相加即可得分离筛被振动轮顶起时所做运动产生的机械能 E_G。分离筛产生的机械能由振动频率和振幅决定,结合 $\theta = 2\pi f$,将机械能公式转化为振动频率 f 和振幅 A 关系,可得

$$\begin{cases} f = \sqrt{\dfrac{E_G}{2\pi^2 A^2}} \\ A = \sqrt{\dfrac{2E_G}{m\theta^2}} \end{cases} \tag{2}$$

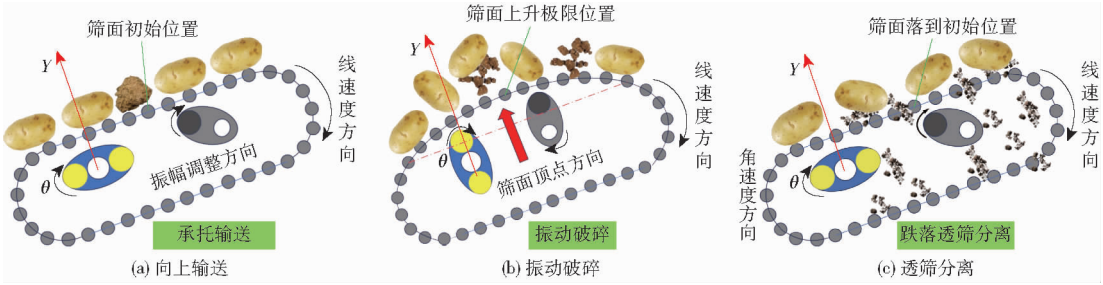

图 5 薯土混合物分离特性图

Fig. 5 Separation characteristics of potato-soil mixture

从式(2)可分析出，随分离筛振动参数的增加，分离筛作业过程中的动能增大，增强的动能直接转化为更为剧烈的碰撞作用力，从而加剧薯块的机械损伤。

2.2　输送带筛分面积分析

分离筛工作时通过改变分离输送带长度来改变输送带筛分面积，筛分面积不同会使马铃薯分离效果和损伤效果不同。输送带长度增大，线速度减小，马铃薯运动时间加长，马铃薯分离效率增大，但会使薯块碰撞、挤压和滑动次数增多，薯块损伤加剧；反之，薯块运动时间短，线速度增大，分离效率降低，损伤减小。设分离输送带长度为 L，宽度为 W，如图 6 所示。

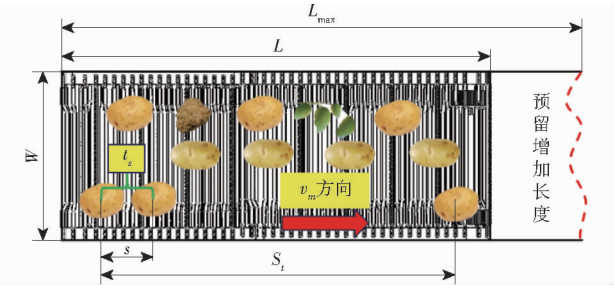

图 6　分离筛筛分面积图

Fig. 6　Separation screen screening area diagram

输送带运动时受到振动轮和振幅装置的作用，平行于筛面的加速度为 $a(t_0)$，m/s^2，t_0为分离筛的作业时间，s。设马铃薯与输送带间的滑动摩擦因数为 μ，普通马铃薯的质量为m_0，kg。分离筛作业时，当分离输送带的加速度 $a(t_0) \geqslant \mu g$ 时，薯块在分离筛上逐渐处于滑动状态，滑动时间t_s满足

$$\begin{cases} a(t_0) = A\theta^2\cos(\theta t_0) \\ A\theta^2\cos(\theta t_s) = \mu g \end{cases} \tag{3}$$

式中　g——重力加速度，m/s^2

薯块在一个振动周期内的滑动距离 s 由加速度积分求得

$$s = A\theta^2(\sin(\theta t_2) - \sin(\theta t_1)) - \mu g(t_2 - t_1) \tag{4}$$

薯块在分离筛上滑动时，与杆条接触会产生碰撞或挤压损伤，单次滑动摩擦损伤能量为 E_s，薯块在分离筛上的总运动期间受到的总振动次数为 N，单次试验时，分离输送带速度v_m一般保持不变，可得薯块在分离筛上的总损伤能量E_T为

$$E_T = NE_s = \frac{\mu m_0 g\theta s L}{v_m} \tag{5}$$

为实现马铃薯的收获减损效果，马铃薯在滑动摩擦中承受的最大能量应小于薯块与杆条产生的临界冲击能量 E_c。基于 Hertz 接触理论，马铃薯与分离输送带碰撞时产生的临界冲击能量为 E_c，则有

$$\begin{cases} \dfrac{\mu m_0 g\theta s L}{v_m} < E_c \\ E_c = \dfrac{\pi^5}{60}\sigma_c^5 R^3 E_y^{-4} \end{cases} \tag{6}$$

式中　E_y——马铃薯杨氏模量，Pa

σ_c——马铃薯抗压强度，Pa

R——马铃薯表面拟合半径，mm

为使马铃薯在分离筛筛分面积内受到损伤最小，联立式(5)、(6)可得分离输送带的最大长度为

$$L_{max} < \frac{\pi^5 v_m \sigma_c^5 R^3 E_y^{-4}}{60\mu m_0 g\theta s} \tag{7}$$

由式(7)可知输送带长度与薯块分离时的损伤程度相关，充足的筛分空间促使物料层更均匀铺展，避免局部拥堵造成挤压。查阅文献[16]可知，马铃薯抗压强度 σ_c 取 1.35 MPa，马铃薯杨氏模量取 5.4 MPa，块茎质量m_0取 320 g，马铃薯表面拟合半径 R 取 28 mm，单次滑动距离 s 取 12 mm。根据前期马铃薯联合收获机试验测试基础，分离筛线速度v_m = 0.8 m/s，振动轮角速度 θ = 50 rad/s，薯块与杆条之间的动摩擦因数取 0.3，代入式(7)，结合试验台的设计尺寸，输送带长度范围设计为 4 800 ~ 5 600 mm。

2.3　两级分离输送带高度差分析

在薯土混合物料输送初始阶段，土壤含量较高，为优化输送分离过程中的薯土分离效果，同时最大程度规避块茎因碰撞导致的机械损伤[17]，试验台采用两级式分离筛输送带设计。一级分离输送带主要完成物料输送分离作业，分离后的马铃薯块茎在脱离一级输送带末端时，受其运动惯性及重力作用，形成独特的斜抛运动轨迹，如图 7 所示。

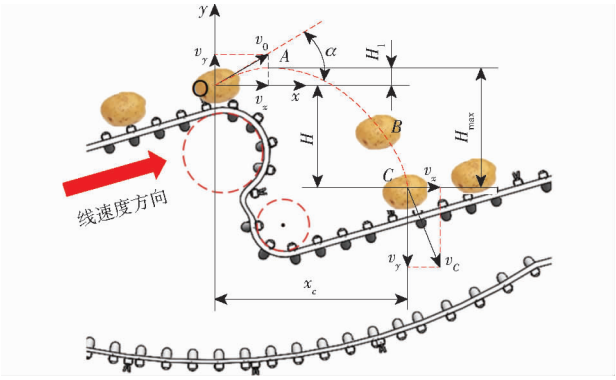

图 7　分离筛末端薯块运动轨迹分析图

Fig. 7　Analysis of potato pieces' motion trajectory at end of separation screen

马铃薯从一级筛以初速度v_0斜抛至二级筛，运动时间为 t，s；速度方向与水平面夹角为 α，(°)；如图 7 所示，其运动分解为水平方向速度v_x和竖直方向v_y，公式为

$$\begin{cases} v_x = v_0\cos\alpha \\ v_y = v_0\sin\alpha - gt \end{cases} \tag{8}$$

二级输送分离筛与一级输送分离筛的垂直高度差为 H,薯土混合物从分离筛上斜抛后,运动到点 A 的竖直分速度为零,分析可得薯块从一级分离筛斜抛到二级分离筛的运动时间 t_{OC} 为

$$t_{OC} = t_{OA} + t_{AC} = \frac{v_0\sin\alpha}{g} + \sqrt{\frac{2H}{g} + \frac{(v_0\sin\alpha)^2}{g^2}} \tag{9}$$

薯土混合物运动到点 C 的瞬时速度为

$$v_C = \sqrt{v_0^2 + 2gH} \tag{10}$$

薯块掉落到橡胶杆条上接触瞬间,与杆条产生瞬时碰撞,碰撞后速度为零,冲击力为 F,瞬时碰撞时间为 ΔT,冲击力由动量定理得

$$F = \frac{m_0\Delta v}{\Delta T} = \frac{m_0\sqrt{v_C^2 + 2gH_{\max}}}{\Delta T} \tag{11}$$

式中 Δv——薯块碰撞瞬间速度变化量,m/s

假设薯块碰撞瞬间与杆条的接触面积为 S,为避免薯块受到损伤,薯块受到的压应力 σ 应小于马铃薯临界抗压强度 $\sigma_{\max}$,则有

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{m_0\sqrt{v_C^2 + 2gH_{\max}}}{S\Delta T} < \sigma_{\max} \tag{12}$$

进行变形求解,为避免损伤可推导出薯块掉落的最大高度差

$$H_{\max} < \frac{(\sigma_{\max}S\Delta T)^2 - m_0^2v_C^2}{2gm_0^2} \tag{13}$$

马铃薯块茎从一级输送带末端以近似抛物线轨迹向二级输送带下落过程中,为有效减轻块茎与二级输送带杆条碰撞造成的机械损伤,同时兼顾分离筛驱动轮与导向轮的空间布局限制,将两级输送带间的垂直高度差 H 确定为 160 mm。结合式(10)~(13)可知,薯块在两级输送带间的最大跌落高度差直接决定其碰撞动能大小,临界抗压强度越低、接触面积越小、线速度越高时,动能向机械损伤的转化效率增大。

3 损伤机理分析试验

3.1 试验设备与材料

试验马铃薯挖自张家口市沽源县平定堡镇,品种为冀张薯 12 号,种植深度为 5~15 cm,马铃薯块茎直径 40~150 mm,质量 110~650 g,土杂混合物为田间就地取样,含有细土、土块、杂草等,土壤类型为沙壤土,土壤含水率为 15.8%。根据马铃薯的田间种植情况和本试验的要求,试验时薯土质量配比为 1∶3。设备有便捷式计算机、485 转换器、扭矩传感器、变频器、空气开关、电气控制箱、输送带控制仪、高速摄影机等,如图 8 所示。



(a) 试验物料配比 (b) 试验物料混合 (c) 试验设备

图 8 试验物料与设备

Fig. 8 Test materials and equipment

3.2 薯土分离过程高速摄影试验

利用 Fastec HiSpec 5 型高速摄影机记录薯土混合物碰撞、挤压、翻滚回流等分离过程,进一步揭示马铃薯分离作业机理。探测器分辨率 1 680 像素×1 694 像素,控制软件为 HiSpec,拍摄帧率 240 f/s,曝光时间 3 860 μs。

3.2.1 薯土分离过程高速摄影图像解析

薯土分离过程高速摄影图像如图 9 所示,用 ProAnalyst 动力学分析软件创建视频时间线,进行调色、稳定化处理和帧率划分后,记录 9 s 的视频得到 301 帧图像。以马铃薯落入分离筛的初始时刻为零时刻,设为第 1 帧图像,每间隔 36 帧选取一帧高速图像。

从第 1 帧开始,薯土混合物以一定初速度首次接触振动筛面的瞬间,碰撞力使土壤破损、变形、解体成更小的细土,在分离筛的往复运动下平铺在筛面,对薯块起到缓冲保护作用。从第 109 帧开始,薯土混合物在输送过程中逐渐堆积,相邻薯土之间产生接触压力。薯块在压力作用下发生有限的弹性变形,当挤压力超过薯块屈服极限时,可能发生局部压伤或压裂[18]。第 109 帧到 289 帧,在筛面向上输送的过程中薯土混合物会发生翻滚回流,伴随着无数次的微小碰撞和挤压。尺寸较小的土壤穿过下方的杆条间隙直落掉落。

为探究薯土混合物在输送筛分过程中受往复振动影响下的运动学特征,利用 Feature Tracking 功

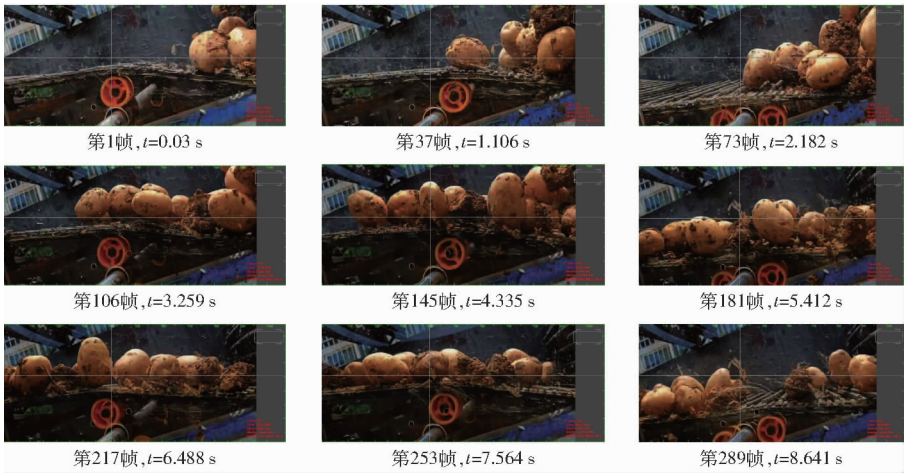

图 9　薯土分离过程高速摄影图像

Fig. 9　High-speed photography of potato-soil separation process

能，对薯块输送过程进行逐帧标记分析。对不同薯块采用可区分的色彩标记其几何中心点，土块则标记其近似几何中心点。分析流程为：自起始帧起，对选定薯块 a 进行逐帧标记，标记 301 帧后，对标记点进行曲线拟合。薯块和土块的运动曲线合集如图 10 所示，薯块和土块的运动轨迹曲线近似于简谐运动，筛体向上加速时，薯块受惯性力脱离筛面，形成低抛物线轨迹，下落撞击筛面后，在筛面振动场的作用下，实现连续抛掷。

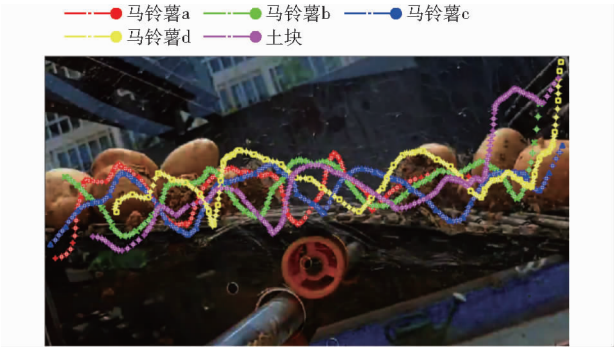

图 10　薯土混合物运动曲线轨迹图

Fig. 10　Trajectory diagram of motion curve of potato soil mixture

3.2.2　薯块及土块速度与加速度曲线分析

曲线拟合后，用 ProAnalyst 动力学分析软件的 Graph Configuration 功能对薯块和土块的运动速度进行分析，速度曲线分析如图 11 所示。

速度曲线最小值直接反映了碰撞的剧烈程度，薯土混合物输送过程中最高速度为 23.58 像素/s，最低速度为 12.97 像素/s。翻转、跳跃速度为 0 时，即与筛面保持相对静止。由于筛面对薯块施加向上的摩擦力和薯块自身的惯性，薯块向上加速。当筛面的向上加速度超过重力加速度时，筛面比薯块下落的速度还快，薯块与筛面之间的接触力理论上会变为零，薯块脱离筛面。薯块在运动轨迹的末端，以一定的速度和角度撞击再次上升，碰撞结束后，薯块获得了一个新的速度矢量，持续下一输送周期。

同理，利用 Graph Configuration 功能对薯块和土块的运动加速度进行分析，加速度曲线如图 12 所示。

薯块加速度曲线揭示薯块受到力的方向及强度，其变化幅度大于速度曲线。薯土混合物最高加速度为 16.67 像素/s^2，最低加速度为 0.41 像素/s^2。筛体从振动最低点开始向上加速运动，薯块向上加速度在此阶段约等于筛面向上加速度。当筛面向上加速度达到并超过重力加速度时，薯块脱离筛面，薯

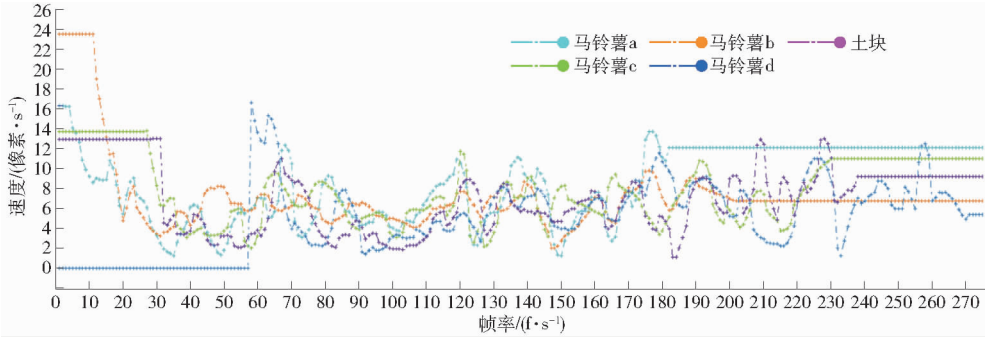

图 11　薯块及土块速度曲线

Fig. 11　Velocity curves of potato tubers and soil clods

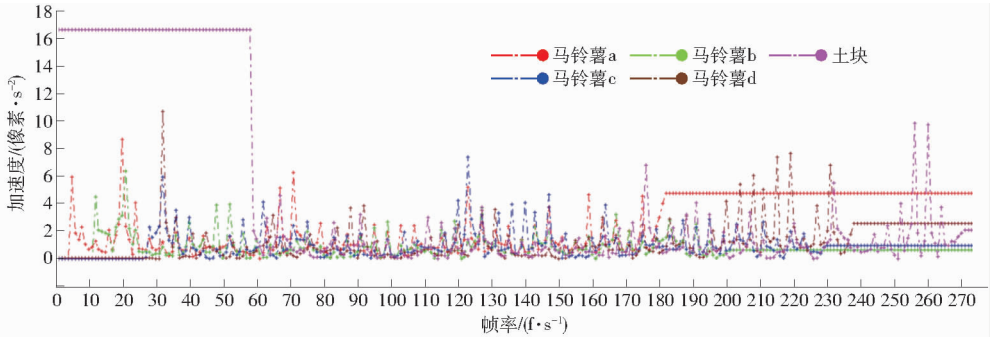

图 12 薯块及土块加速度曲线

Fig. 12 Acceleration curves of potato tubers and soil clods

块在重力作用下做抛体运动,其轨迹最终会与再次上升的筛面相交,发生碰撞。当薯块与筛面分离或进入相对静止时,薯块以比原始加速度较低的加速度进入下一个周期的随筛加速。可知筛体的振幅、振动频率、倾角直接影响薯块的碰撞频率及挤压强度。

3.3 作业参数对输送分离性能的影响

3.3.1 试验方法与评价指标

通过薯土分离过程动力学分析和高速摄影分析可知,分离筛振动频率、振幅、线速度、倾角是影响薯土高效低损分离的关键参数。因此,在试验台上采用单因素试验确定振幅、振动频率、线速度、倾角的影响范围,进一步通过响应面试验获得最优参数组合。根据 NY/T 648—2015《马铃薯收获机质量评价技术规范》将伤薯率R_1、破皮率R_2和含杂率R_3作为试验评价指标。

3.3.2 单因素试验分析

试验时采用控制变量法,不同分离筛线速度、倾角对试验指标影响变化曲线如图 13 所示。随着分离筛线速度的增大,马铃薯伤薯率、破皮率增大,含杂率降低;线速度 0.2 ~ 0.4 m/s 内变化较小,0.6 ~ 1.2 m/s 内变化较大;线速度大于 1.2 m/s 后均大于各项指标作业范围。同理分离筛倾角 15° ~ 20°内变化较小,20° ~ 35°内变化较大;倾角大于 35°后破皮率、伤薯率不符合作业要求。

不同分离筛振幅、振动频率时试验指标变化曲线如图 14 所示。随着分离筛振动频率增大,马铃薯伤薯率、破皮率均增大,含杂率减小;振动频率2.5 ~ 7.5 Hz 内变化较小,7.5 ~ 12.5 Hz 内变化较大;振动频率大于 12.5 Hz 后破皮率、伤薯率不符合作业要求范围。同理分离筛振幅 10 ~ 20 mm 内变化较小,20 ~ 50 mm 内变化较大;振幅大于 50 mm 后破皮率、伤薯率不符合作业要求。

3.4 多因素优化试验

3.4.1 试验设计及结果

由单因素试验分析确定分离筛线速度(X_1)

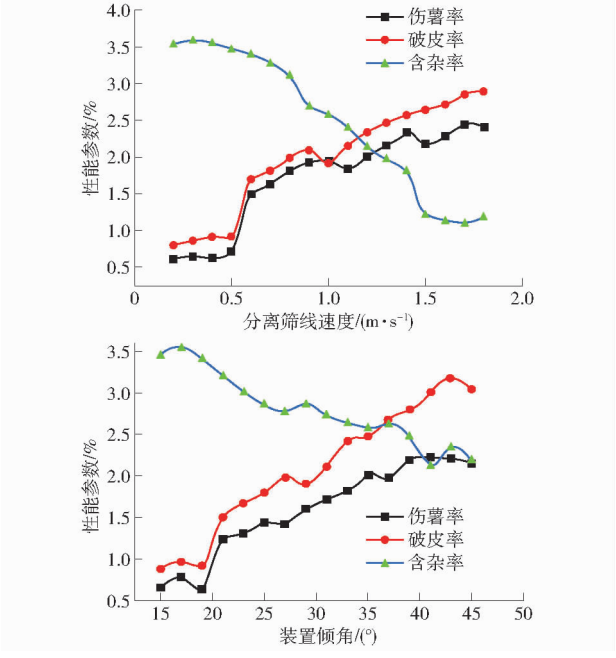

图 13 不同线速度、倾角时试验指标变化曲线

Fig. 13 Curve of linear velocity and inclination angle on test indicators

0.6 ~ 1.2 m/s、倾角(X_2)20° ~ 35°、振动频率(X_3)7.5 ~ 12.5 Hz、振幅(X_4)20 ~ 50 mm 为试验影响因素范围,开展四因素三水平响应面试验,精简后试验共 18 组。试验方案与结果见表 2。

3.4.2 方差分析与拟合度检验

(1)伤薯率、破皮率回归分析与显著性检验

马铃薯伤薯率、破皮率方差分析如表 3 所示,当$P<0.01$时,表明模型极显著;失拟项$P>0.1$,说明模型可靠度高。可知试验因素X_1、X_2、X_3、X_4对马铃薯伤薯率有极显著影响;在试验因素交互作用影响中,X_1^2、X_2^2、X_3^2、X_4^2均对马铃薯伤薯率有极显著影响,X_1X_3、X_1X_4、X_2X_3、X_2X_4对马铃薯伤薯率有显著影响,其余试验因素对马铃薯伤薯率影响不显著。同上,试验因素X_2对马铃薯破皮率有极显著影响;在各项试验因素交互作用影响中,X_1X_3、X_3X_4、X_1^2、X_2^2、X_3^2、X_4^2均对马铃薯破皮率有极显著影响,X_1X_4对马铃薯破皮率有显著影响,其余试验因素对马铃薯破

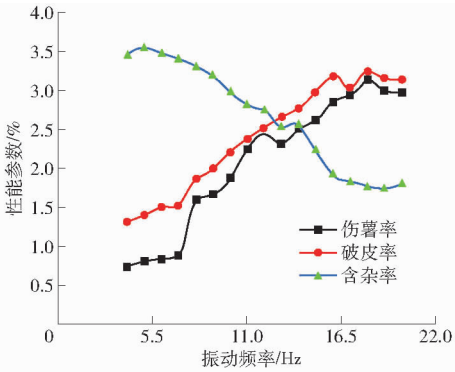

图 14　不同振动频率、振幅时试验指标变化曲线

Fig. 14　Variation curves of influence of amplitude and vibration frequency on test indicators

表 2　试验方案与结果

Tab. 2　Experimental plan and results

序号	因素				R_1/%	R_2/%	R_3/%
	X_1/(m·s^{-1})	X_2/(°)	X_3/Hz	X_4/mm			
1	0.9	20.0	10.0	50	1.60	2.01	3.20
2	0.9	35.0	12.5	35	2.51	3.15	4.01
3	0.6	20.0	10.0	35	1.69	2.31	3.01
4	0.9	27.5	12.5	20	2.53	3.71	4.51
5	0.9	20.0	10.0	20	1.70	2.38	3.34
6	1.2	27.5	10.0	20	2.27	3.26	4.10
7	0.9	27.5	12.5	50	2.12	2.92	3.91
8	0.9	27.5	7.5	50	2.08	3.20	4.17
9	0.9	27.5	10.0	35	3.04	4.01	5.00
10	1.2	27.5	7.5	35	2.57	3.61	4.51
11	1.2	27.5	10.0	50	1.78	3.01	3.91
12	0.9	27.5	10.0	35	3.10	4.06	5.00
13	0.9	20.0	7.5	35	1.98	2.71	3.69
14	0.6	27.5	7.5	35	2.28	3.15	3.95
15	0.9	35.0	10.0	20	2.15	2.84	3.86
16	0.9	35.0	7.5	35	2.16	2.69	3.70
17	0.6	27.5	10.0	20	1.91	2.88	3.81
18	1.2	20.0	10.0	35	1.81	2.28	3.11

表 3　马铃薯伤薯率及破皮率方差分析

Tab. 3　Variance analysis of potato bruise rate and potato skin breakage rate

来源	马铃薯伤薯率				马铃薯破皮率			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	5.89	14	78.65	<0.000 1 **	8.97	14	61.58	<0.000 1 **
X_1	0.108 3	1	20.23	0.000 5 **	0.013 3	1	1.28	0.276 6
X_2	0.294 5	1	55.03	<0.000 1 **	0.130 2	1	12.52	0.003 3 **
X_3	0.056	1	10.47	0.006 **	0.021 7	1	2.08	0.170 9
X_4	0.27	1	50.44	<0.000 1 **	0.020 8	1	2.00	0.178 9
X_1X_2	0.024	1	4.49	0.052 5	0.027 2	1	2.62	0.128
X_1X_3	0.027 2	1	5.09	0.040 6 *	0.099 2	1	9.54	0.008 **
X_1X_4	0.036 1	1	6.74	0.021 1 *	0.09	1	8.65	0.010 7 *
X_2X_3	0.027 2	1	5.09	0.040 6 *	0.018 2	1	1.75	0.206 9
X_2X_4	0.04	1	7.47	0.016 2 *	0.034 2	1	3.29	0.091 2
X_3X_4	0.012 1	1	2.26	0.154 9	0.093	1	8.94	0.009 7 **
X_1^2	1.26	1	235.59	<0.000 1 **	1.9	1	182.32	<0.000 1 **
X_2^2	2.94	1	549.55	<0.000 1 **	7.25	1	696.61	<0.000 1 **
X_3^2	0.178 6	1	33.36	<0.000 1 **	0.108 8	1	10.46	0.006 **
X_4^2	2.5	1	467.21	<0.000 1 **	1.25	1	119.75	<0.000 1 **
失拟	0.042 4	10	0.521 7	0.815 8	0.137 5	10	6.77	0.040 1
总和	5.97	28			9.11	28		

注：* 表示影响显著（0.01≤P≤0.05）；** 表示影响极显著（P<0.01）。

皮率影响不显著。剔除对马铃薯伤薯率、破皮率影响不显著交互项和平方项，伤薯率R_1和破皮率R_2的回归模型分别为

$$R_1 = -17.77 + 10.03X_1 + 0.64X_2 + 0.59X_3 + 0.24X_4 - 0.11X_1X_3 - 0.02X_1X_4 + 0.004X_2X_3 - 0.001X_2X_4 - 4.9X_1^2 - 0.01X_2^2 - 0.023X_3^2 - 0.003X_4^2 \quad (14)$$

$$R_2 = -23.32 + 0.013X_1 + X_2 + 0.026X_3 + 0.017X_4 - 0.21X_1X_3 - 0.033X_1X_4 - 0.004X_3X_4 - 6.01X_1^2 - 0.019X_2^2 - 0.021X_3^2 - 0.002X_4^2 \quad (15)$$

（2）含杂率方差分析与显著性检验

马铃薯含杂率方差分析如表 4 所示，可知模型极显著且可靠度高。试验因素 X_1、X_2、X_4对马铃薯含杂率有极显著影响；X_1^2、X_2^2、X_3^2、X_4^2、X_1X_3均对马铃

表 4 马铃薯含杂率方差分析

Tab. 4 Variance analysis of potato impurity content

来源	平方和	自由度	F	P
模型	10.12	14	67.75	<0.000 1 **
X_1	0.163 3	1	15.31	0.001 6 **
X_2	0.200 2	1	18.76	0.000 7 **
X_3	0.007	1	0.656 8	0.431 3
X_4	0.264	1	24.74	0.000 2 **
X_1X_2	0.025 6	1	2.4	0.143 7
X_1X_3	0.129 6	1	12.15	0.003 6 **
X_1X_4	0.002 5	1	0.2343	0.635 8
X_2X_3	0.019 6	1	1.84	0.196 8
X_2X_4	0.087	1	8.16	0.012 7 *
X_3X_4	0.081 2	1	7.61	0.015 4 *
X_1^2	2.37	1	222.5	<0.000 1 **
X_2^2	7.41	1	694.33	<0.000 1 **
X_3^2	0.231 1	1	21.66	0.000 4 **
X_4^2	1.94	1	182.21	<0.000 1 **
失拟	0.147 8	10	36.95	0.001 7
总和	10.27	28		

薯含杂率有极显著影响，X_2X_4、X_3X_4对马铃薯伤薯率有显著影响，其余试验因素对马铃薯含杂率影响不显著。剔除对马铃薯含杂率影响不显著交互项和平方项，含杂率R_3的回归模型为

$$R_3 = -24.41 + 14.11X_1 + 1.04X_2 + 0.027X_3 + 0.24X_4 - 0.24X_1X_3 - 0.001X_2X_4 - 0.004X_3X_4 - 6.72X_1^2 - 0.02X_2^2 - 0.03X_3^2 - 0.002X_4^2 \quad (16)$$

3.4.3 试验因素对指标的影响响应面分析

根据方差分析和回归模型检验可知，分离筛线速度、倾角、振动频率和振幅之间的交互作用对马铃薯伤薯率、破皮率和含杂率有显著影响，绘制显著性影响因素响应曲面，如图 15 所示。

由图 15a～15c 可知，保持其中两个影响因素不变，同时增大另外因素，马铃薯伤薯率呈先增大后减小的趋势。分离筛线速度 0.8～1.1 m/s、倾角26°～32°、振动频率 8.5～11.5 Hz、振幅 26～38 mm 时，对

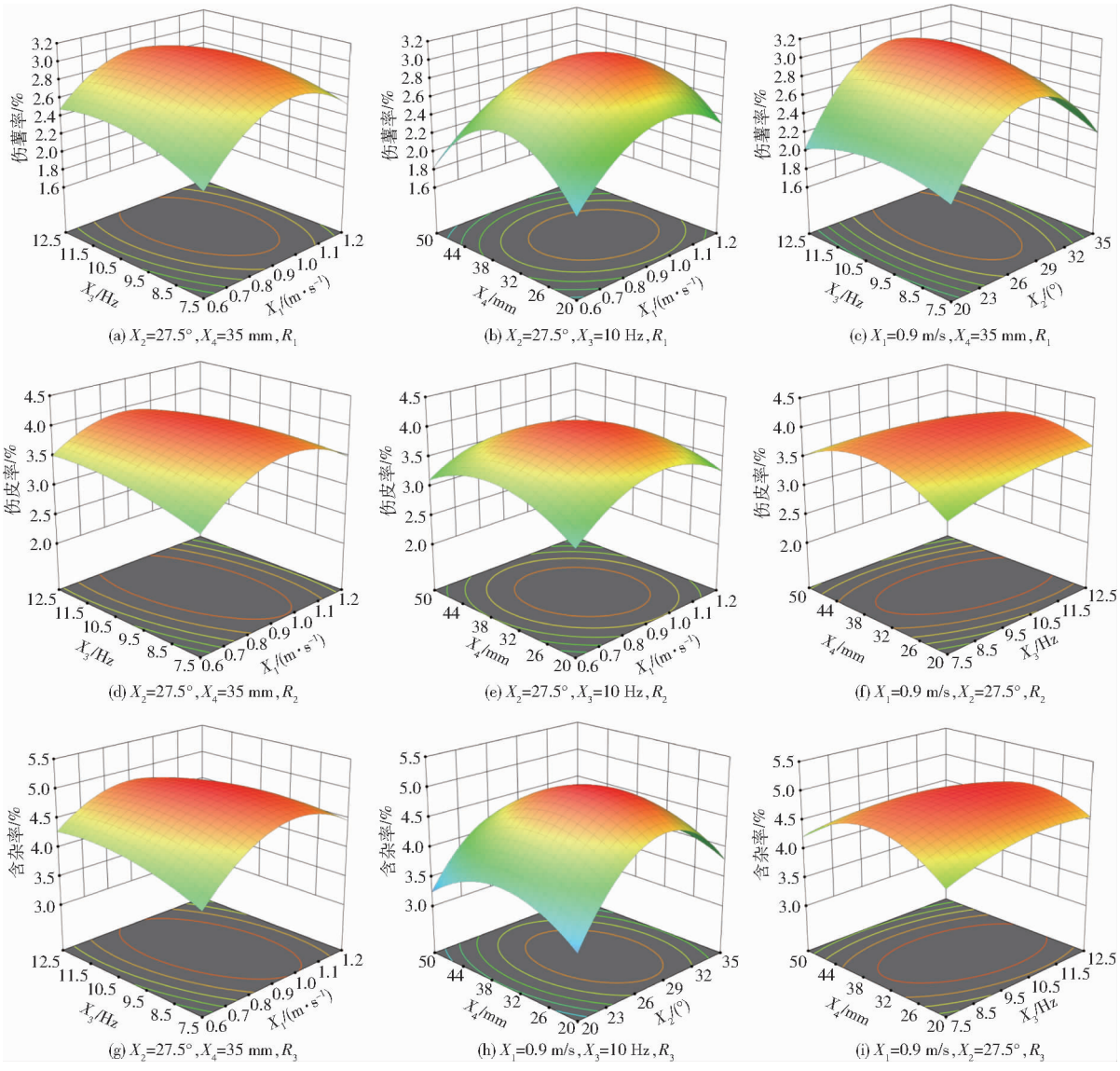

图 15 马铃薯伤薯率、破皮率和含杂率响应曲面

Fig. 15 Response surfaces of potato bruise rate, skin breakage rate and impurity rate

马铃薯伤薯率作用明显。原因为当交互项参数从较低水平开始增加时，薯块在分离筛上的动能显著提升，薯块与分离机构的碰撞频率随之增加。更强的碰撞直接导致薯块表皮和内部组织承受更大的冲击应力，超过薯块组织的耐受极限，加剧损伤。

由图 15d ~ 15f 可知，振动频率与线速度及振动频率与振幅的组合对马铃薯破皮率作用非常显著。影响范围区间分别为线速度 0.8 ~ 1.0 m/s、振动频率 9.5 ~ 11.5 Hz、振幅 26 ~ 44 mm。原因为振动频率、振幅和线速度的交互影响下，薯块在每个振动周期内与筛面有效接触时间增加，薯块表皮会持续不断地经历摩擦或刮擦，导致滑动摩擦累积，引起表皮磨损、擦伤甚至局部剥落。

由图 15g ~ 15i 可知，当线速度、振动频率一定时，含杂率随倾角和振幅增大先增大后减小。显著影响区间为线速度 0.8 ~ 1.0 m/s、倾角 26° ~ 29°、振动频率 9.5 ~ 11.5 Hz、振幅 26 ~ 44 mm。原因为线速度和倾角增大时，薯块在筛面上的停留时间减少，意味着薯块经历有效振动、碰撞、摩擦和透筛的次数和时间减少。部分尚未完全剥离的土壤可能随薯块更快地通过分离区，导致含杂率上升。

3.4.4　参数组合优化与验证

利用 Design-Expert 13.0 软件中的 Optimization 模块对回归模型进行求解，根据 NY/T 648—2015《马铃薯收获机质量评价技术规范》中马铃薯联合收获机马铃薯收获性能要求，选择优化约束条件为

$$\begin{cases} \begin{cases} \min R_1 \\ \min R_2 \\ \min R_3 \end{cases} \\ \begin{cases} 0 \leqslant R_1 \leqslant 2\% \\ 0 \leqslant R_2 \leqslant 3\% \\ 0 \leqslant R_3 \leqslant 4\% \end{cases} \\ \text{s. t.} \begin{cases} 0.6\ \text{m/s} \leqslant X_1 \leqslant 1.2\ \text{m/s} \\ 20° \leqslant X_2 \leqslant 35° \\ 7.5\ \text{Hz} \leqslant X_3 \leqslant 12.5\ \text{Hz} \\ 20\ \text{mm} \leqslant X_4 \leqslant 50\ \text{mm} \end{cases} \end{cases} \tag{17}$$

通过优化求解，当分离筛线速度为 1.2 m/s、装置倾角为 20°、振动频率为 12.495 Hz、振幅为 50 mm 时，预测得到马铃薯伤薯率为 0.701%，破皮率为 1.273%，含杂率为 2.096%。

为了确保优化结果的准确性，采用上述较优参数组合开展 5 次验证试验。考虑试验操作的可行性，将振动频率修正为 12.5 Hz。重复 5 次试验后取平均值。验证试验结果为马铃薯伤薯率为 0.81%，破皮率为 1.36%，含杂率为 2.256%。R_1、R_2和R_3的试验验证值与预测值差异很小，说明最优参数组合可靠。

4　结论

（1）设计了一款马铃薯收获减损机理试验台，主要由分离装置、振频调整装置、振幅调整装置、倾角调整装置、物料监测装置、全角度观测装置等组成，可根据作业需求同步调整多参数的工作范围。对马铃薯的输送分离过程和受力进行分析，推导了输送分离过程中薯土碰撞动力学方程。

（2）开展高速摄影试验和单因素试验。通过高速摄影机得到薯土混合物的分离输送过程，用 ProAnalyst 软件对薯土分离过程进行逐帧分析，进行曲线拟合，得到薯土混合物的运动轨迹曲线。再对薯土混合物的运动轨迹曲线分析，得到薯块及土块的速度曲线和加速度曲线。通过单因素试验分析，得到作业参数范围：线速度 0.6 ~ 1.2 m/s、倾角20° ~ 35°、振动频率 7.5 ~ 12.5 Hz、振幅 20 ~ 50 mm。

（3）开展参数组合优化试验，选取马铃薯伤薯率、破皮率和含杂率为评价指标，用 Design-Expert 13.0 软件对试验结果进行方差分析和响应曲面分析，确定最优参数组合：线速度为 1.2 m/s、装置倾角为 20°、振动频率为 12.495 Hz、振幅为 50 mm。同等参数进行验证试验，马铃薯伤薯率为 0.81%，破皮率为 1.36%，含杂率为 2.256%，各项作业指标均满足马铃薯机械化收获作业要求。

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 mechanized harvesting technology and equipment for potatoes[J]. Transactions of CSAE，2023，39(14)：1 - 22.（in Chinese）

[2] 张兆国，李彦彬，王海翼，等. 马铃薯机械化收获关键技术与装备研究进展[J]. 云南农业大学学报（自然科学），2021，36(6)：1092 - 1103.
ZHANG Zhaoguo，LI Yanbin，WANG Haiyi，et al. Research progress on key technologies and equipment for mechanized harvesting of potatoes[J]. Journal of Yunnan Agricultural University（Natural Science），2021，36(6)：1092 - 1103.（in Chinese）

[3] ZHANG W, ZHU Q, ZHANG T, et al. Design and control of a side dense transplanting machine for sweet potato seedlings on mulch film[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 224: 109193.

[4] RADY A M, GUYER D E. Rapid and/or nondestructive quality evaluation methods for potatoes: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 117: 31 – 48.

[5] STREHMEL N, PRAEGER U, KÖNIG C, et al. Time course effects on primary metabolism of potato (*Solanum tuberosum*) tuber tissue after mechanical impact[J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 56(2): 109 – 116.

[6] LIANG Z, HUANG Y, LI D, et al. Parameter determination of a viscoelastic-plastic contact model for potatoes during transient collisions[J]. Biosystems Engineering, 2023, 234: 156 – 171.

[7] 魏忠彩, 李洪文, 苏国梁, 等. 低位铺放双重缓冲马铃薯收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 140 – 152.
WEI Zhongcai, LI Hongwen, SU Guoliang, et al. Design and experiment of low-position double-buffer potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 140 – 152. (in Chinese)

[8] 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 experiment of roller push type potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 119 – 126. (in Chinese)

[9] 杨德秋, 程子文, 李洋, 等. 装袋型马铃薯联合收获机不停机卸袋装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(6): 351 – 361.
YANG Deqiu, CHENG Ziwen, LI Yang, et al. Design and experiment of non-stop bag unloading device for bagging potato combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 351 – 361. (in Chinese)

[10] 杨德秋, 汪昕, 刘萌萌, 等. 自走式马铃薯捡拾装袋机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 85 – 95.
YANG Deqiu, WANG Xin, LIU Mengmeng, et al. Design and experiment of self-propelled potato picking and bagging machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 85 – 95. (in Chinese)

[11] 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 on tuber damage mechanism during the lifting and separation process of potato excavators[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 103 – 113. (in Chinese)

[12] 吕金庆, 刘金妮, 竹筱歆, 等. 黏重黑土条件下马铃薯收获机挖掘装置设计与试验[J]. 东北农业大学学报, 2024, 55(5): 76 – 89.
LÜ Jinqing, LIU Jinni, ZHU Xiaoxin, et al. Design and experiment of potato harvester excavation device under clay and heavy black soil conditions[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2024, 55(5): 76 – 89. (in Chinese)

[13] LI H, GAO F. Improvement design of separation and conveying machinery and equipment of potato excavator in heavy soil[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2023, 130: 103363.

[14] 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 multi-stage separation buffer potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 96 – 109. (in Chinese)

[15] WANG Y, WEI Z, SU G, et al. Design and study of anti-blocking type potato stubble disc clamping and pulling device based on MBD – DEM coupled simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 229: 109733.

[16] 邓伟刚. 马铃薯块茎碰撞损伤特性与表皮摩擦损伤机理研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
DENG Weigang. Research on the collision damage characteristics and epidermal friction damage mechanism of potato tubers[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[17] 王法安, 温博, 谢晓红, 等. 三七收获机输送分离装置作业机理分析与参数优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊1):201 – 211, 259.
WANG Faan, WEN Bo, XIE Xiaohong, et al. Analysis of operating mechanism and parameter optimization of the conveying and separation device of sanqi harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 201 – 211, 259. (in Chinese)

[18] LIU C, WU N, CHENG G, et al. Design and optimization of a lightweight and simple self-propelled crawler potato combine harvester[J]. Agronomy, 2025, 15(1): 65.