

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.02.009

履带自走式分拣型马铃薯收获机设计与试验

魏忠彩^{1,2} 王兴欢¹ 李学强^{3,4} 王法明^{3,4} 李志合¹ 金诚谦^{1,2}

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255091; 2. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 3. 山东思代尔农业装备有限公司, 德州 253600; 4. 山东省马铃薯生产装备智能化工程技术研究中心, 德州 253600)

摘要: 丘陵山区和小地块是国内马铃薯的主要种植区域, 针对这类地形的马铃薯机械化收获技术与装备匮乏的瓶颈问题, 并结合马铃薯种植农艺和收获需求, 采用自动对行挖掘-薯土分离-人工辅助捡拾相结合的马铃薯机械化单行收获方案, 设计了一种履带自走式分拣型马铃薯收获机。该机主要由履带式底盘、自动对行挖掘装置、分离装置及分拣装置等关键部件组成, 具有附着力大、高频低幅振动碎土、自动对行挖掘、人工辅助分拣和液压驱动模式等技术优势。在阐述总体结构及工作原理的基础上, 结合马铃薯运动学模型和碰撞特性分析, 确定了分离筛倾角为 30° , 分离筛末端与分拣筛始端之间的跌落高度为120 mm等关键部件的结构参数和运行参数。由于采用人工辅助分拣的集薯方式, 减少了薯块跌落与翻滚次数, 缩短了马铃薯的分离行程。田间试验结果表明: 样机作业速度为1.0、1.2 km/h, 分离筛运行速度分别为0.61、0.72 m/s, 分拣筛运行速度分别为0.42、0.50 m/s时, 生产率分别为0.10、0.12 hm²/h; 利用电子马铃薯采集的碰撞加速度平均值分别为51.02 g、51.85 g, 碰撞加速度峰值均小于马铃薯临界损伤阈值, 没有出现薯块漏捡和薯块表皮破损情况, 收获效果良好, 各项性能指标均满足相关标准的要求, 研究可为马铃薯收获机分离分拣装袋工艺和马铃薯收获机的结构优化改进提供参考。

关键词: 马铃薯收获机; 履带自走式; 自动对行装置; 辅助分拣

中图分类号: S225.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)02-0095-12

OSID:



Design and Experiment of Crawler Self-propelled Sorting Type Potato Harvester

WEI Zhongcai^{1,2} WANG Xinghuan¹ LI Xueqiang^{3,4} WANG Faming^{3,4} LI Zhihe¹ JIN Chengqian^{1,2}

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

2. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China

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

4. Shandong Provincial Intelligent Engineering and Technology Research Center for Potato Production Equipment, Dezhou 253600, China)

Abstract: Hilly and mountainous areas were the main potato planting areas in China. In view of the low efficiency of mechanized harvesting and separation and picking up of potatoes in small plots, a crawler type self-propelled sorting potato harvester was designed in combination with the requirements of potato planting agronomy and harvesting. The overall structure and key components of the prototype were designed, which were mainly composed of crawler drive chassis, excavation device, automatic alignment device, separation device and sorting device. The prototype had technical advantages such as crawler driven walking, high-frequency low amplitude vibration clod crushing, automatic row excavation, manual auxiliary sorting and hydraulic drive mode. On the basis of describing the overall structure and working principle, combined with the potato kinematics model and collision characteristics analysis, the structural parameters and operating parameters of the key components were determined to achieve the goal of high efficiency and low loss harvest. The separating screen was inclined at 30° , the distance between two adjacent gear rods was 210 mm, the height of the stop bar was 25 mm, the maximum rotating speed of separator driving wheel was 120 r/min, the maximum line speed of the sorting screen was 0.65 m/s, the drop height between the end of the separating screen and the beginning of the sorting screen was 120 mm. As the method of manually assisted potato sorting and gathering was adopted, the number of drops and

收稿日期: 2022-11-14 修回日期: 2022-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(52105266)、山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2021TSGC1332)、中国博士后科学基金面上项目(2021M701801)和南京市博士后科研资助计划项目

作者简介: 魏忠彩(1990—),男,讲师,农业农村部南京农业机械化研究所博士后,主要从事现代农业装备研究,E-mail: weizc@sdu.edu.cn

通信作者: 金诚谦(1973—),男,研究员,博士生导师,主要从事大田作物收获机械化与智能化技术研究,E-mail: 412114402@qq.com

rolls of potato blocks was reduced, the separation stroke of potatoes was shortened, and the collision frequency and damage of potatoes in unit time were reduced, which was helpful to realize the loss reduction harvest. The prototype was tested in the field. The results of the field test showed that when the operating speeds of the prototype were 1.0 km/h and 1.2 km/h, the running linear speeds of the separating screen were 0.61 m/s and 0.72 m/s, the running linear speeds of the sorting screen were 0.42 m/s and 0.50 m/s, and the productivity was 0.10 hm²/h and 0.12 hm²/h, respectively. The average value of the three peak impact acceleration of electronic potato was 51.02 g and 51.85 g, the peak impact acceleration of potato was less than the critical damage threshold. There was no missing inspection and skin damage of potatoes, and the effect of the harvest was good. All performance indexes met the requirements of relevant standards.

Key words: potato harvester; crawler self-propelled type; automatic alignment device; auxiliary sorting

0 引言

中国作为马铃薯第一生产大国,其产量占据全球马铃薯产量的23%,但2021年国内马铃薯机收率仅为32%左右^[1-3]。马铃薯收获装备依然是国内农机领域的“短板弱项”,收获环节的清选、除杂、分级、装袋等工序的劳动力投入较大^[4-5],制约了马铃薯相关产业的发展。区域间的地理特点、土壤特性和种植品种等因素使得每个地区需要匹配的收获装备和收获工艺各不相同。例如,西北、西南混作区的马铃薯种植面积和产量均位于全国主产区前列,但其受限于地形条件和土壤特性,导致马铃薯收获机械化水平仍然较低;南方冬作区的冬闲稻田种植马铃薯,由于地块小、土壤粘重,多采用垄作或畦作,目前还主要以人工作业为主;东北土壤粘重地区,收获后的马铃薯除杂和清洁等技术水平仍待提高;丘陵山区或小地块的马铃薯收获,目前尚以人工收获为主,因此马铃薯颗粒归仓和抢收生产迫在眉睫^[6-9]。

根据技术原理和结构不同,马铃薯收获机大致可分为轻筒型挖掘式、分段收获式和联合收获式^[10-11]。马铃薯收获机的分离装置一般包括环形分离装置^[12]、薯秧分离装置^[13]、多级输送分离装置^[14]、杆链-摆动分离筛^[15-16]、摆抖激振薯土分离装置、非等距集薯分离装置^[17]和低位铺放缓冲分离装置^[18]等,由于依靠拖拉机提供动力,因此转弯半径大、作业灵活性差,难以满足丘陵山区和小地块的作业工况多变、地头空间小等作业需求;分段收获机挖掘分离后的薯块铺放于地表,后续由人工捡拾的劳动强度大、且占用劳动力多;而联合收获机的分离行程更大,且易导致伤薯破皮现象,因此更是难以适应丘陵山区和小地块的收获需求。收获期的马铃薯含水率高、表皮脆嫩,导致薯块在收获过程中由于碰撞产生弹跳、翻滚、摩擦甚至挤压而影响收获品质。对于马铃薯机械化收获来说,薯土分离、清土除杂和铺放集薯过程是确保降低含杂率的关键,但这些环

节的碰撞冲击也是造成伤薯破皮现象的主要原因^[17-19]。因此,如何减轻马铃薯受到的损伤,在保证分离效果的同时减少马铃薯的分离行程、抛落高度和次数等尤为关键^[20-21]。

由于马铃薯种植的特殊性,收获时薯土混合物需整垄挖掘,薯土杂分离量大,马铃薯在分离筛上的运动复杂多变且随机性强,高效分离与低损收获难以兼顾。就分拣型薯类收获机而言,单垄单行甘薯联合收获机可对甘薯一次性完成挖掘、分离、除秧、升运和输送作业^[22];黑龙江心语机械公司研发的马铃薯联合收获机,采用“多级分离+立式环形提升”的分离输送机构,可实现人工辅助分拣作业;日本生产的TPH-179型分拣型马铃薯联合收获机,可配备5人实施捡拾除杂作业;德国GRIMME、美国Double L以及比利时AVR和Dewulf等公司研发的自走式马铃薯收获机功能齐全,一般配备有分拣平台,人工辅助分拣石块、土块和秧蔓等杂质;韩国生产的SHI-1500型分拣式马铃薯联合收获机也配备人工分拣平台,薯群经人工分拣后进入料斗或进行装袋作业,作业效率较高。但上述装备一般体积庞大,即便是平原地区广泛使用的中小型收获机械也不能很好地适应丘陵山区及小地块作业工况^[6]。丘陵山区和小地块适合体积较小的自走式马铃薯收获机下地作业^[23],采用筛面分离与人工辅助分拣相结合的收获方式具有实用价值和现实意义。

本文在前期马铃薯收获试验的基础上,结合马铃薯种植农艺及实际作业需求,针对丘陵地区或小地块马铃薯种植,基于履带式自走技术、自动对行挖掘技术以及筛面分离与人工辅助分拣相结合的作业方式,开发一款履带自走式分拣型马铃薯收获机,在阐述总体设计和工作原理的基础上,进行关键部件设计与参数选取,并对履带式底盘、自动对行挖掘装置、分离分拣装置以及液压控制系统等关键部分进行设计与田间试验,为马铃薯收获机分离分拣装袋工艺和结构优化改进提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

履带自走式分拣型马铃薯收获机结构如图1所示,主要由履带式底盘、自动对行挖掘装置、分离装置、分拣装置和液压控制系统等部分组成,采用筛面分离与人工辅助分拣相结合的作业方式,彻底解决了薯块先铺放于地面后再进行人工捡拾而导致的跌落损伤及切线擦伤等问题,同时也减轻了劳动强度。

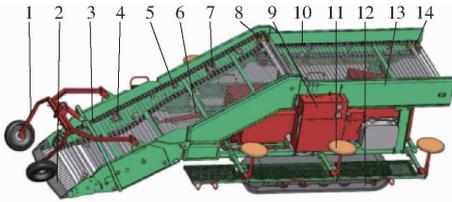


图1 履带自走式分拣型马铃薯收获机整机结构图

Fig.1 Structure diagram of crawler self-propelled sorting type potato harvester

1. 自动对行装置 2. 挖掘铲 3. 分离筛 4. 前振动轮 5. 支承轮 6. 液压缸 7. 后振动轮 8. 分离筛驱动轮 9. 操纵装置 10. 分拣筛 11. 座椅 12. 行走底盘 13. 机架 14. 分拣筛驱动轮

样机的机架前端设置有挖掘装置和自动对行装置,机架立板内侧筛面下方装有振动轮,前部下方装有液压缸,以便控制前部的升降和挖掘铲铲面的入土深度;分离筛和分拣筛分别安装在底盘前部和中部上方。收获机田间作业时,机架前部通过液压缸的调节使其处于工作状态(图1);转运地块或地头转弯时,机架前部则收起处于折叠状态(图2)。

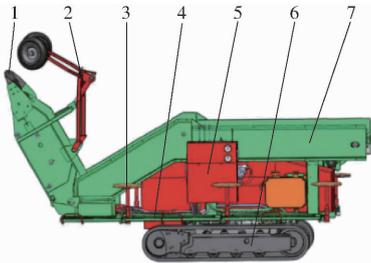


图2 履带自走式分拣型马铃薯收获机折叠状态

Fig.2 Folding state diagram of crawler self-propelled sorting type potato harvester

1. 挖掘铲 2. 自动对行装置 3. 座椅 4. 分拣平台 5. 操纵装置 6. 行走底盘 7. 机架

1.2 工作原理

收获作业之前,首先根据种植行距调整自动对行装置的2个对行轮之间的距离,确保倾斜布置的2个对行轮压在马铃薯薯垄两侧,以引导挖掘装置及整个马铃薯收获机沿着马铃薯薯垄前进。收获作业时,挖掘铲将挖掘的薯土混合物输送至分离筛始端,然后随着分离筛和分拣筛朝着收获方向的后方运行,以完成薯土分离和人工辅助分拣过程。被动

式振动轮随着分离筛的运行而转动,迫使分离筛产生高频低幅振动,以提高分离筛的分离效率^[17-18]。履带式底盘两侧设有分拣平台,经分离筛的薯土杂分离后的马铃薯被输送至分拣筛,然后人工辅助对分拣筛筛面上的马铃薯进行捡拾装袋,分拣筛剩余的秧蔓、土块等杂质则被输送至马铃薯收获机末端后跌落至地表。履带自走式分拣型马铃薯收获机主要技术参数如表1所示。

表1 履带自走式马铃薯收获机主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of crawler self-propelled type potato harvester

参数	数值/形式
收获机工作状态尺寸(长×宽×高)/ (mm×mm×mm)	4 800×2 060×1 500
收获机运输状态尺寸(长×宽×高)/ (mm×mm×mm)	3 800×1 400×2 400
整机质量/kg	1 300
行走方式	自走式
收获垄数	1
作业幅宽/mm	1 000
挖掘深度/mm	≥200
作业速度/(km·h ⁻¹)	0.5~1.5
作业效率/(hm ² ·h ⁻¹)	0.05~0.15
履带宽度×接地长度/(mm×mm)	230×1 450
履带中心距/mm	900
行走变速方式	液压无级变速
发动机类型	空冷四冲程三缸 涡轮增压
发动机排量/L	1.218
发动机功率/kW	21(2 100 r/min)

1.3 主要技术及结构特点

履带自走式分拣型马铃薯收获机采用的履带式底盘、液压驱动模式、自动对行挖掘和人工辅助分拣模式的优势在于:①履带式底盘与液压驱动模式:节约了作业空间,转弯半径小,机动性、爬坡能力强,且可根据作业工况实时调整分离筛运行速度、挖掘深度、分拣筛运行速度等作业参数,以满足不同的作业工况需求。②自动对行挖掘:利用自动对行装置的对行轮“扶垄”行走,进而可根据实际收获工况对履带自走式收获机的前进方向进行微调,避免“挖深、挖偏”等现象的发生。③筛面分离与人工辅助分拣相结合:挖掘后薯土混合物经过分离筛分离后输送至分拣筛,由分拣平台两侧的捡拾工手动分拣、分级入筐或装袋,因此可有效避免输送至地面所造成的二次跌落损伤,并且减小了人工弯腰捡拾的劳动强度。

2 关键部件设计与参数确定

2.1 自动对行挖掘装置设计

在实际收获过程中,丘陵山区地形平坦不一、垄

体与垄沟高低不平、薯垄“歪、扭”程度不一,易出现“挖浅、挖偏”现象进而导致伤薯、漏薯等。自动对行挖掘装置是引导履带自走式马铃薯收获机挖掘与分离装置乃至整个收获机正确地沿着薯垄前进的关键部件,主要由对行轮、对行支撑架、挖掘铲、手动可调式伸缩缸和调整支撑架等构成,如图3所示。

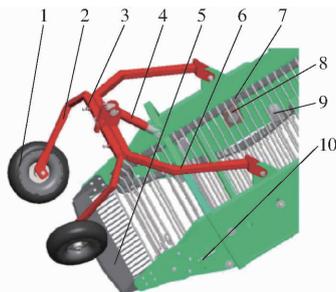


图3 自动对行挖掘装置结构图

Fig.3 Structure diagram of automatic alignment digging device

1. 对行轮 2. 对行支撑架 3. 调整销 4. 手动可调式伸缩缸
5. 挖掘铲 6. 调整支撑架 7. 分离筛 8. 振动轮 9. 支承轮
10. 张紧装置

两对行轮呈一定夹角对称安装在对行支撑架两侧,并且对行轮可自由旋转。在收获作业过程中,对行轮在履带驱动作用下向前滚动,为了避免出现滑移现象而影响对行的准确性,两对行轮始终“骑行”在薯垄两侧,且对行轮的滚动前进方向平行于马铃薯收获机的前进方向(图4)。

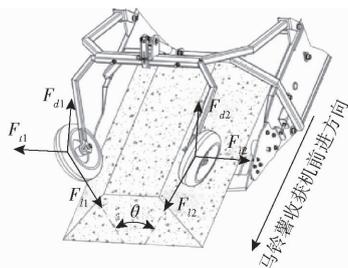


图4 对行轮工作示意图

Fig.4 Schematic of operation of counter wheel

由于两对行轮之间存在一定角度,则满足

$$\begin{cases} F_{di} = F_{di} \tan \frac{\theta}{2} \\ F_{li} = F_{li} \sin \frac{\theta}{2} \\ F_{di} = F_{li} \cos \frac{\theta}{2} \\ \Delta F_i = |F_{l1} - F_{l2}| \end{cases} \quad (1)$$

式中 F_{li} ——薯垄作用于对行轮上的水平分力,N
 F_{di} ——薯垄作用于对行轮上的垂直分力,N
 F_{li} ——对行轮对薯垄的正压力,N
 ΔF_i ——对行轮作用在薯垄两侧的水平分力差值,N
 θ ——两对行轮对薯垄正压力的夹角,(°)

其中 $i=1,2$,分别对应于薯垄两侧的对行轮。作业过程中,挖掘铲受到薯垄土壤的作用力往往会产生挖掘深度调控不当的现象,设置的液压缸可处于实时浮动状态,垄侧土壤反作用于对行轮在铅锤方向的分力可有效防止挖掘铲越挖越深、收获机能耗较高和分离筛分离负担重等;对行轮在左右两垄侧的水平分力差值 ΔF_i 超出一定范围后,土壤反作用于对行轮在水平方向上的分力通过对行轮宽度支撑架传递给马铃薯收获机机架,驱动履带行走的液压马达可对收获速度进行微调,使马铃薯收获机沿着薯垄正确前进。

因此,自动对行挖掘装置可有效避免挖掘铲挖掘深度过深导致的薯土拥堵现象和挖掘铲位置不当导致的马铃薯切伤现象。根据马铃薯垄作种植特点,对行轮直径过大将影响机具的质量和体积,反之则薯垄的凹凸不平或个别土块将会影响对行轮的对行作业,因此取对行轮直径为 330 mm;对行轮宽度决定了对行轮与薯垄侧面之间的单位面积压力,过小易导致对行轮陷入薯垄土壤内,从而影响对行效果,因此取对行轮宽度为 100 mm; θ 过大或过小时,影响自动对行挖掘效果,也会降低对行轮上的轴承寿命。根据马铃薯垄作种植特点,为合理分配对行轮在水平方向与垂直方向的作用力,为使单行收获方式具有良好的自动对行挖掘和后续稳定的分离分选效果,设计的对行轮直径为 330 mm,宽度为 100 mm,两对行轮之间的夹角 θ 为 50°。

2.2 分离装置和分选装置设计

2.2.1 分离筛设计与参数确定

分离筛的斜置角度和运行速度是影响分离效果的重要参数。分离筛由杆条、连接带和挡杆等构成,呈 4 杆条-1 挡杆交替布置的结构形式排列,如图 5 所示。在分离筛运行的过程中完成薯土杂分离和输送,由于分离筛呈靠近挖掘装置一端低、靠近分选筛一端高的斜置状态,安装在每组杆条之间的挡杆在满足薯土杂分离效率的前提下可有效限制薯块的回流现象,确保马铃薯能够顺利输送到分选筛中。

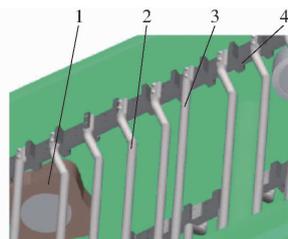


图5 分离筛筛面局部结构图

Fig.5 Partial structure diagram of separating screen surface

1. 振动轮 2. 杆条 3. 挡杆 4. 连接带

在薯土杂分离过程中,薯块和秧蔓、土壤等杂质

混合物经挖掘铲挖掘输送至分离筛后, 由于分离筛筛面的透筛作用^[17], 筛面上方的物料分布逐渐由“薯块-土壤-杆条”接触状态转变为“薯块-杆条”直接接触状态。由于马铃薯逐渐失去土壤的缓冲保护作用, 薯块易产生较大的碰撞加速度, 从而产生“碰撞弹跳”甚至“回流翻滚”现象^[24]。分离筛筛面具有一定的斜置角度, 薯块“碰撞弹跳”或者“回流翻滚”作用迫使部分动能转化为重力势能, 从而导致原来与分离筛运行速度相等的薯块与分离筛筛面再次接触时, 其速度小于分离筛的运行速度。筛面物料转变为“薯块-杆条”直接接触状态时以及薯块产生弹跳后再次接触杆条时, 将分离筛筛面前端杆条、后端杆条对薯块的作用力分解为前端杆条、后端杆条对薯块的支持力和前端杆条、后端杆条对薯块表面的摩擦力, 如图 6 所示。

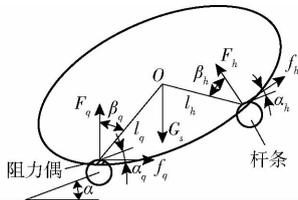


图 6 马铃薯在分离筛筛面上的受力分析

Fig. 6 Force analysis of potato on separating screen surface

对薯块在分离筛筛面上的受力状态进行分析, 有

$$\begin{cases} F_s = f_q \cos \alpha_q + F_q \sin \alpha_q + f_h \cos \alpha_h \\ F_x = G_s \sin \alpha + F_h \sin \alpha_h \end{cases} \quad (2)$$

式中 F_s ——薯块受到沿分离筛斜面向上的分力, N
 F_x ——薯块受到沿分离筛斜面向下的分力, N
 G_s ——薯块受到的重力, N
 F_q, F_h ——前端杆条、后端杆条对薯块的支持力, N
 f_q, f_h ——前端杆条、后端杆条对薯块的摩擦力, N
 α ——分离筛筛面倾角, ($^\circ$)
 α_q, α_h ——前端杆条、后端杆条对薯块的摩擦力与分离筛筛面夹角, ($^\circ$)

对于分离筛筛面上前后相邻 2 根杆条对薯块的摩擦力, 主要与薯块对杆条的正压力以及薯块-杆条的摩擦系数有关。当 $F_s = F_x$ 时, 薯块被稳定向上输送, 当 $F_s < F_x$ 时, 由于重力作用, 薯块依托于筛面杆条的支承作用减弱, 沿分离筛斜面方向向下滑动, 此时薯块发生顺时针转动。对薯块在分离筛筛面上受到的转矩进行分析^[25], 有

$$\begin{cases} M_s = F_q l_q \sin \beta_q \\ M_n = f_q l_q \cos \beta_q + F_h l_h \sin \beta_h + f_h l_h \cos \beta_h \end{cases} \quad (3)$$

式中 M_s ——薯块受到的顺时针力矩, N·m

M_n ——薯块受到的逆时针力矩, N·m

l_q, l_h ——前端杆条、后端杆条与薯块接触到薯块质心的距离, m

β_q, β_h ——前端杆条、后端杆条对薯块的支持力与薯块质心到杆条和薯块接触点连线的夹角, ($^\circ$)

当 $M_s \neq M_n$ 时, 薯块发生转动, 由于薯块自身粘弹性特性, 且与杆条接触为面接触, 薯块在接触面区域易产生形变并产生阻力偶, 阻力偶方向与薯块转动方向相反, 从而阻碍薯块的转动。当薯块在分离筛筛面发生翻滚或滑动时, 与杆条或挡杆发生碰撞, 当薯块与挡杆发生碰撞时, 对薯块进行受力分析如图 7 所示, F_{sp} 为挡杆对薯块的作用力, N; F_l 为杆条对薯块的作用力, N; l_{gg} 为相邻两根杆条之间的距离, m; l_{pg} 为杆条与挡杆之间的水平距离, m; h_{pt} 为挡杆的高度, m。薯块滑移至杆条与挡杆交接位置的过程中, 由于薯块与杆条发生非完全弹性碰撞^[26-27], 使自身形变消耗一定能量, 在挡杆的阻挡作用下, 薯块在杆条和挡杆的双重支撑作用下处于稳定状态。假设薯块滚动和滑动的距离为分离筛两挡杆之间的距离, 在翻滚过程中满足能量守恒

$$m_s g l_p \sin \alpha = E_k + E_f + E_c \quad (4)$$

式中 m_s ——薯块质量, kg

g ——重力加速度, m/s^2

l_p ——分离筛两相邻挡杆之间的长度, m

E_k ——在与挡杆碰撞前薯块的动能, J

E_f ——摩擦力在薯块翻滚和滑动时所做的功, J

E_c ——薯块翻滚和滑动非弹性形变所消耗的功, J

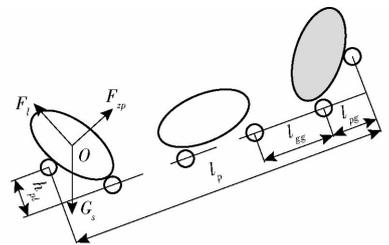


图 7 马铃薯与挡杆碰撞时的受力分析

Fig. 7 Force analysis of potato in collision with blocked rod

分析可知, 马铃薯的重力势能转变为动能和其他的无用功。在薯块和挡杆发生碰撞时, 碰撞符合动量守恒^[25], 且短暂的碰撞过程外界的作用力可忽略^[28-29], 假设薯块碰撞后沿与筛面垂直方向产生“弹跳”^[26,30], 根据能量守恒定律可得

$$E_k = m_s g h_{pt} \quad (5)$$

式中 h_{pt} ——薯块碰撞弹跳高度, m

为了防止薯块的碰撞弹跳高度大于所设置的挡

杆高度,导致薯块跌落至下一个挡杆区间,而造成马铃薯损伤,则需满足

$$h_{pl} \cos \alpha \geq h_{pt} \quad (6)$$

联立式(4)~(6)得

$$h_{pl} \geq \frac{m_s g l_p \sin \alpha - E_f - E_c}{m_s g \cos \alpha} \quad (7)$$

在实际工作过程中,由于薯块翻滚位移小于两挡杆之间长度,所需要的挡杆高度小于计算值。为了防止马铃薯在筛面上碰撞弹跳、翻滚回流和保证良好的分离效果,结合文献,取杆条和挡杆直径均为11 mm,分离筛相邻杆条之间的距离 $l_{gg} = 45$ mm;根据设计的机具高度,分离筛斜置角度过大时,薯块在分离过程中易翻越挡杆至下一挡杆区间,产生薯块回流现象^[31-32];分离筛斜置角度过小时,分离筛输送马铃薯到所设定的分拣筛高度所需的分离筛行程过长,导致整机长度过长,因此取分离筛斜置角度为 30° ;由式(7)可知,两挡杆间距与挡杆高度成正比例关系,查得马铃薯与65 Mn 杆条碰撞产生损伤临界速度为 2.506 m/s^[33],为降低薯块因回流而产生疲劳累计损伤,并确保一定的薯土分离效果,相邻两挡杆之间的距离 l_p 取210 mm,即杆条与挡杆之间的水平距离 l_{pg} 取37.5 mm;为避免薯块翻越挡杆掉落到下一个挡杆区间,挡杆高度 h_{pl} 取25 mm。

2.2.2 振动轮设计与参数确定

振动轮采用圆角四边形结构,如图8所示, R_z 为振动轮边圆半径, m; d_z 为振动轮中心与边长之间距离, m。左右对称安装在机架的内侧,随着分离筛的运动而被动转动,给分离筛施加高频低幅振动,迫使筛面呈现“微波浪形”向后运行,从而加速薯土分离进程,提高作业效率。振动轮无驱动装置,当分离筛运转时带动振动轮被动转动,分离筛产生高频低幅的振动效果^[34]。

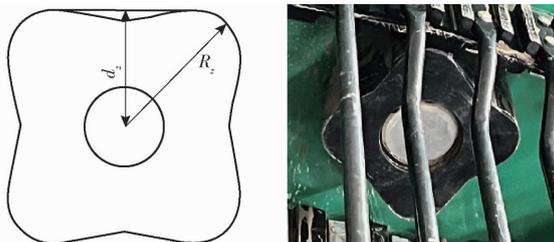


图8 振动轮

Fig. 8 Vibrating wheel

根据《农业机械设计手册》^[35],当 d_z/R_z 为0.6~0.7时,分离效果较好,结合丘陵山区特点,为起到良好的高频低幅碎土分离和细碎土壤透筛分离效果,振动轮边圆半径取65 mm,振动轮中心与边长之间距离取44 mm。

2.2.3 分离筛和分拣筛相对位置设计与参数确定

分拣筛主要由杆条和连接带构成,相邻两杆条间的距离与分离筛相邻杆条之间的距离相同,分拣筛的筛面杆条覆有柔性的橡胶材料,将分离筛输送的物料继续向后输送,由分拣平台两侧的捡拾工分拣入筐或装袋。马铃薯在收获过程中的损伤主要来自马铃薯受到的挤压、碰撞和冲击作用^[33,36]。分离筛末端与分拣筛始端有一定的跌落高度,故薯块在分离筛的末端产生斜抛运动,运动模型可简化为平面抛物线运动,如图9所示。

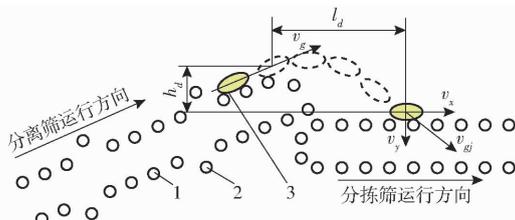


图9 分离筛与分拣筛衔接处的马铃薯运动学分析

Fig. 9 Kinematic analysis of potato at joint of separation screen and sorter screen
1. 杆条 2. 挡杆 3. 薯块

在分离筛末端薯块的运动方程为

$$\begin{cases} l_d = v_g t_d \cos \alpha \\ h_d = v_g t_d \sin \alpha - \frac{1}{2} g t_d^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中 v_g ——薯块被抛出的瞬时速度, m/s

t_d ——薯块自分离筛至分拣筛跌落用时, s

l_d ——薯块自分离筛抛出的水平方向位移, m

h_d ——薯块自分离筛至分拣筛跌落高度, m

薯块在杆条和挡杆的承托作用下运移至分离筛末端时,薯块的运动主要受分离筛运行的影响,将薯块被抛起时的瞬时速度近似为分离筛线速度,即

$$v_g = v_s = \frac{n_s \pi (d_q + 2d_h)}{60} \quad (9)$$

式中 v_s ——分离筛运行速度, m/s

n_s ——分离筛驱动轮转速, r/min

d_q ——分离筛驱动轮分度圆直径, m

d_h ——连接带厚度, m

$$\begin{cases} v_x = v_g \cos \alpha \\ v_y = v_g \sin \alpha - g t_d \\ v_{gj} = \sqrt{(v_x - v_j)^2 + v_y^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中 v_x ——薯块抛落至分拣筛在水平方向瞬时速度, m/s

v_y ——薯块抛落至分拣筛在垂直方向瞬时速度, m/s

v_{gj} ——薯块与分拣筛刚接触时相对于分拣筛的瞬时速度, m/s

v_j ——分拣筛运行速度, m/s

联立式(8)~(10)并整理得

$$\begin{cases} t_d = \frac{\pi n_s (d_q + 2d_h) \sin \alpha + \sqrt{\pi^2 n_s^2 (d_q + 2d_h)^2 \sin^2 \alpha + 2gh_d}}{g} \\ v_{gj} = \sqrt{\left[\frac{n_s \pi (d_q + 2d_h) \cos \alpha}{60} - v_j \right]^2 + \left[\frac{n_s \pi (d_q + 2d_h) \sin \alpha}{60} - gt_d \right]^2} \end{cases} \quad (11)$$

通过捡拾工对输送带上的马铃薯进行捡拾试验可知,分拣筛速度过大时,易因捡拾不及时而出现漏检,分拣筛的运行最大线速度取0.65 m/s;为保证分离效果,避免斜抛行程过大而产生马铃薯损伤,防止分离筛运行速度过快而导致的分离筛末端抛落的薯块与分拣筛的薯块产生碰撞冲击,结合马铃薯的损伤临界速度^[33]和式(11)进行分析,分离筛的最大运行线速度取0.9 m/s,计算得分离筛驱动轮最大转速为119.8 r/min,圆整取为120 r/min,即分离筛驱动轮的分度圆直径取0.125 m,连接带厚度取10 mm;分离筛末端与分拣筛始端之间的跌落高度取120 mm,分离筛与分拣筛运行速度可通过调速阀调节。在马铃薯收获机两侧设置分拣平台,两侧的分拣平台上设有可调高度座椅、一侧相邻的座椅间距设为1 m,捡拾工可以在分拣平台上对分拣筛输送的马铃薯进行捡拾装袋。

2.3 履带驱动式底盘与液压控制系统设计

2.3.1 履带驱动式底盘设计

履带自走式分拣型马铃薯收获机的底盘主要由驱动架、行走液压马达、驱动轮、从动轮和行走履带等组成,能够确保整机的稳定行走和部件连接。左右两侧履带的运行速度和运行方向,可通过手柄操纵控制,来实现马铃薯收获机的前进、后退、转弯和无级调速,如图10所示。对马铃薯收获机通过性进行分析可知,在保证正常工作条件的情况下,增加两履带之间中心距、接地长度和降低质心高度,都可增加收获机行走时的稳定性^[37-39],根据整机质量并结合丘陵山区和小地块特点、行距以及整机结构,确定履带宽度为230 mm,履带接地长度取1450 mm,两履带中心距取900 mm。

2.3.2 液压驱动系统设计原理

液压驱动系统是履带自走式分拣型马铃薯收获机正常运行的核心,通过发动机驱动液压泵,进而带动其他作业部件运行。考虑在凹凸不平的地面工况下作业,采用液压传动对不同的路面工况的适应性更好,可以适应不同作业负荷和行驶阻力的变化,而且可以实现无级变速,能够获取较为稳定的收获速度。

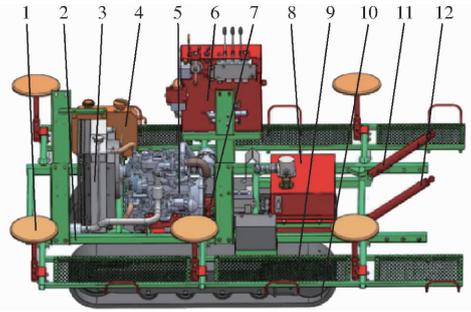


图10 底盘结构图

Fig. 10 Structure diagram of chassis

1. 操作座椅 2. 底盘连接架 3. 散热器 4. 柴油油箱 5. 柴油发动机 6. 操纵装置 7. 液压泵 8. 液压油箱 9. 分拣平台
10. 行走履带 11. 液压缸 I 12. 液压缸 II

2.3.3 自走式行走液压马达参数确定

收获机两侧的行走履带由2个液压马达分别驱动,安装位置如图11所示。在前期初步试验的基础上,根据收获机作业速度和田间作业需求,为避免动力不足现象,确定液压马达的排量为195 mL/r,连续扭矩为455 N·m,转速为385 r/min,且在手动换向阀进油口处安装减压阀和单向阀。

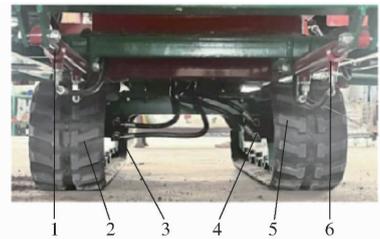


图11 履带行走液压马达安装位置实物图

Fig. 11 Physical picture of installation position of self-propelled traveling hydraulic motor

1. 液压缸 I 2. 左行走履带 3. 左行走履带液压马达 4. 右行走履带液压马达 5. 右行走履带 6. 液压缸 II

2.3.4 液压缸参数确定

收获过程的挖掘深度主要通过液压缸缸杆的伸缩来调整控制,2个液压缸左右对称布置在底盘连接架与机架之间,在液压缸两油路上设有节流阀,调节液压缸的伸缩速度;在两油路间安装换向阀、溢流阀和单向阀,保证液压缸在工作时产生“浮动”效果,非工作时可切换“锁定”和“自由”两种状态,以提高液压缸内密封圈寿命和降低收获机工作负载,根据实际需求,结合自动对行挖掘装置的自身质量、工作压力和处于折叠状态时的提升高度,采用缸径为40 mm、杆径为25 mm和行程为450 mm的双作用液压缸。

2.3.5 分离筛和分拣筛驱动参数确定

分离筛和分拣筛主要通过链传动由2个液压马达分别驱动,由于分离筛的筛面宽度为985 mm、筛面长度为2428 mm,分拣筛的筛面宽度为985 mm、

筛面长度为 1 589 mm,按照挖掘深度为 200 mm 的整垄挖掘收获对应的分离筛和分选筛的物料输送量进行分析,确定选用排量为 200.9 mL/r、最大扭矩为 369 N·m、最大功率为 8 kW 的液压马达,能够满足分离筛和分选筛在较大物料输送量工况下的驱动,分离筛和分选筛驱动装置如图 12 所示。在电磁换向阀进油口处设有流量控制阀,分离筛和分选筛的运行速度可实现无级变速。马铃薯收获机液压控制阀如图 13 所示。

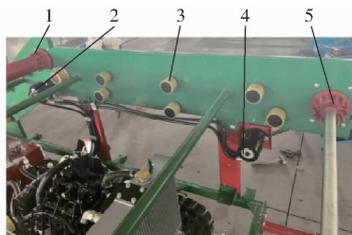


图 12 分离筛和分选筛驱动装置

Fig. 12 Driving device of separating and sorting screen

1. 分离筛驱动轮 2. 分离筛液压马达 3. 支承轮 4. 分选筛液压马达 5. 分选筛驱动轮

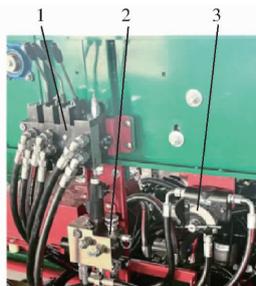


图 13 马铃薯收获机液压控制阀

Fig. 13 Hydraulic control valve of potato harvester

1. 手动换向阀体 2. 电磁换向阀体 3. 流量控制阀

2.3.6 液压油泵确定及操纵装置设计

收获机在工作时,驱动履带行走的液压马达工作负荷较大,故液压油流量需求较大;用于分离筛和分选筛驱动的液压马达工作负荷较小,流量需求相对较小。经计算分析,确定采用 CBTL-F420-F416-AFPR 型双联齿轮油泵,泵量分别为 20、16 mL/r,其中大流量齿轮泵用于 2 个驱动履带行走的液压马达的运转,小流量齿轮泵用于 2 个分离筛和分选筛驱动的液压马达和 2 个液压缸工作,双联齿轮油泵通过法兰联轴器与发动机连接,将发动机输出动力传递到双联齿轮油泵中。马铃薯收获机操纵装置如图 14 所示,马铃薯收获机作业时,启动开关,闭合挖掘铲安全开关,分离筛、分选筛输送开关作用失效,拨动挖掘铲升降开关,挖掘铲升降到合适位置后,操纵左履带操纵杆和右履带操纵杆,使挖掘铲对准马铃薯垄底部,断开挖掘铲安全开关,挖掘铲升降开关作用失效,接通分离筛、分选筛输送开关,马铃薯

收获机分离筛、分选筛运转,操纵行走速度调节手柄和油门,可根据收获条件实时调节马铃薯收获机的行走速度和分离筛、分选筛的运行速度。马铃薯收获机液压驱动系统原理如图 15 所示。

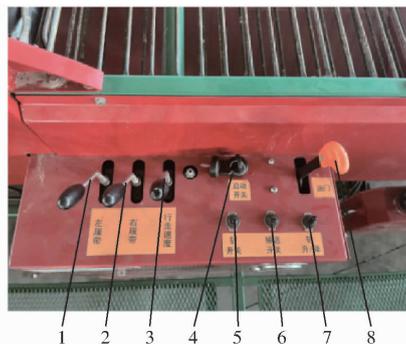


图 14 马铃薯收获机操纵装置

Fig. 14 Control device of potato harvester

1. 左履带操纵杆 2. 右履带操纵杆 3. 行走速度调节手柄 4. 启动开关 5. 挖掘铲安全开关 6. 分离筛、分选筛输送开关 7. 挖掘铲升降开关 8. 油门

3 性能试验

3.1 试验条件与过程

2022 年 6 月,在山东思代尔农业装备有限公司河南省开封市试验基地进行样机性能试验,试验前未进行杀秧作业,试验区马铃薯种植为单垄双行,覆膜种植,土壤类型为沙壤土,土质细软,垄距 1 100 mm,垄高 200 mm。试验过程中,每次收获垄长 120 m,共收 8 行,配有 6 个捡拾工在机具两侧捡拾筛面上的马铃薯。种植品种为希森 4 号和希森 6 号,样机田间测试的挖掘深度取 220 mm,在前期初步试验的基础上,作业速度设定为 1.0、1.2 km/h,对应的分离筛运行速度分别调整为 0.61、0.72 m/s,分选筛运行速度分别调整为 0.42、0.50 m/s。利用电子马铃薯碰撞检测技术,获取不同的马铃薯收获机作业速度、分离筛和分选筛运行线速度条件下的马铃薯碰撞特征,每组试验分别测试 3 次。

试验仪器包括:三轴尺寸 80 mm × 90 mm × 60 mm 的电子马铃薯,如图 16 所示,采样频率 0.488 ~ 5 kHz,内存为 32 KB,质量 270 g,工作环境温度 -29 ~ 60℃,频率响应范围 0.005 ~ 3 kHz,所能承受最大碰撞力为 450 g,配套有 PCIRD 软件(美国 Techmark 公司)和 DT-2236B 型测速仪(深圳市源恒通科技有限公司)。

样机测试结果如表 2 所示。田间作业情况如图 16 所示。履带自走式分选型马铃薯收获机样机运行稳定,未出现设备动力不足等问题导致的作业停滞或中断等情况,自动对行挖掘效果、分离筛的薯土分离效果以及分离筛和分选筛的衔接效果均较好。

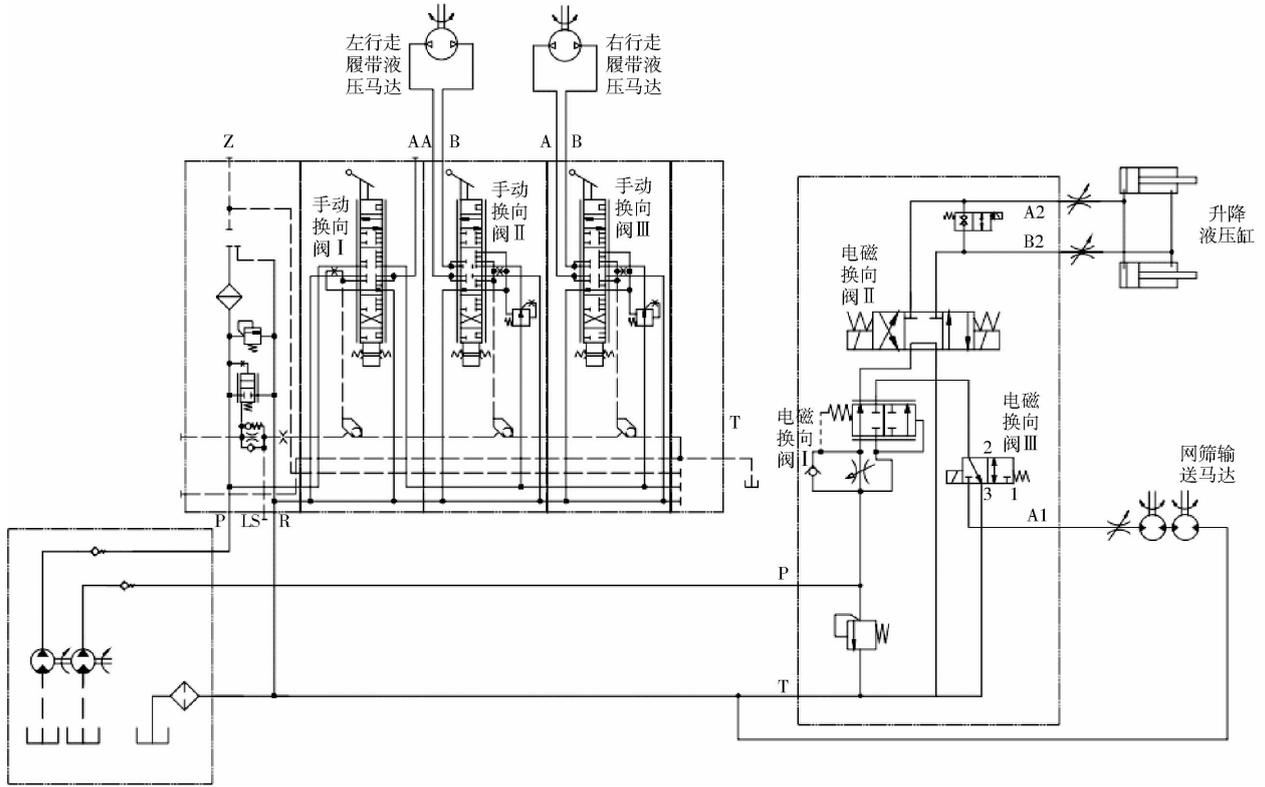


图 15 液压驱动系统原理图

Fig. 15 Schematic of hydraulic drive system

表 2 样机测试结果

Tab. 2 Test result of prototype

样机作业速度/ 速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	分离筛运行速度/ 速度 v_s / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	分拣筛运行速度/ 速度 v_j / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	3 次碰撞加速度峰值/ 速度峰值/ g	碰撞加速度峰值平均 值/ g	生产率/ ($\text{hm}^2\cdot\text{h}^{-1}$)
1.0	0.61	0.42	51.07、50.3、 51.7	51.02	0.10
1.2	0.72	0.50	62.55、50.93、 42.06	51.85	0.12

马铃薯,并将相关的数据传送至计算机。田间试验表明:当履带自走式分拣型马铃薯收获机的作业速度为 1.0、1.2 km/h 时,分离筛运行速度分别为 0.61、0.72 m/s,分拣筛运行速度分别为 0.42、0.50 m/s 时,采集的 3 次碰撞加速度峰值的平均值为 51.02 g、51.85 g,碰撞加速度峰值均小于薯块碰撞损伤的加速度峰值^[33],如图 17 所示,对应的作业生产率分别为 0.10、0.12 hm^2/h ,试验过程中未出现薯块漏检和伤薯破皮现象,收获效果较好。



图 16 收获试验

Fig. 16 Harvest experiment



图 17 电子马铃薯碰撞检测装置及数据采集过程

Fig. 17 Impact record device of potato and data collection process

3.2 试验结果与分析

试验过程中,将电子马铃薯分别掩埋于薯垄的左侧、中部和右侧,电子马铃薯和薯土混合物经挖掘装置后依次进入分离筛和分拣筛;电子马铃薯的碰撞特征与运行轨迹等同于实际马铃薯,因此电子马铃薯可获取相关的碰撞加速度及碰撞产生的时间;单个试验过程完成后,可从分拣筛的末端取出电子

试验过程中还发现,当分离筛和分拣筛的运行速度增大时,薯块在分离筛末端抛起的瞬时速度随之增大,迫使薯块跌落至分拣筛筛面的瞬时碰撞冲击作用力较大,马铃薯的碰撞加速度峰值也变大。收获速度大于 1.2 km/h 时,单位时间内进入分离筛和分拣筛的薯土混合物量较多,分拣筛上的薯块相

对较多,部分薯块被覆盖于秧蔓下,出现在视野盲区,存在捡拾工来不及捡拾而导致马铃薯混同于土块和秧蔓从分拣筛跌落至地表现象,影响收获品质和作业效率;收获速度小于1.2 km/h时,单位时间内进入分离筛和分拣筛的薯土混合物量较少,分拣筛上的薯块相对较少,存在捡拾工“无薯可捡”而停歇的现象,影响收获效率。因此,可根据当地土壤环境和种植情况,合理的调整收获机的收获速度,提高收获效率。

分析可知,由于在机械化收获前未进行杀秧作业,部分马铃薯秧蔓较粗长,且秧蔓的韧性较强,薯-秧之间的连接作用力较大,不易拉断,增加了人工捡拾过程中的薯-秧分离过程,从而在一定程度上影响收获效果。然而,对于韧性较弱的秧蔓,薯-秧之间的连接作用力较小,易拉断,人工捡拾过程中的薯-秧分离效果较好。由于样机未设置秧蔓分离机构,自分离筛向分拣筛跌落过程中,薯块跌落在布有柔性秧蔓的分拣筛筛面上,相比于跌落在裸露的分拣筛杆条上,增大了薯块跌落在分拣筛筛面上的碰撞接触面积,可有效减少薯块与薯块、薯块与筛面之间的碰撞摩擦,因此可最大限度减轻机械损伤与切线擦伤^[34]。在薯土杂分离阶段,振动轮迫使筛面产生高频低幅的振动,有利于细碎土壤的透筛分离和土块的破碎分离^[40-41]。同时,分拣筛的筛面杆条覆有柔性的橡胶材料,也可以起到减损防损的效果。履

带自走式分拣型马铃薯收获机的分离筛和分拣筛的运行速度可根据收获过程中的薯土比例和人工捡拾效率等实际情况进行调节,当分离筛和分拣筛的速度过大时,由于土壤来不及透筛而导致分拣筛筛面上的部分马铃薯掩埋于土层中而影响捡拾,分拣筛的运行速度过快也会导致捡拾工来不及捡拾导致薯块跌落至地表。

4 结论

(1)设计了一款履带自走式分拣型马铃薯收获机,由履带驱动式底盘、自动对行挖掘装置和分拣平台等关键部件组成,具有履带驱动行走、高频低幅振动碎土、自动对行挖掘、人工辅助分拣和液压驱动模式等技术优势,可实现马铃薯收获的减损防损。

(2)田间试验表明,样机作业速度为1.0、1.2 km/h,分离筛运行速度分别为0.61、0.72 m/s,分拣筛运行速度分别为0.42、0.50 m/s时,生产率分别为0.10、0.12 hm²/h;电子马铃薯采集的3次碰撞加速度峰值的平均值为51.02 g、51.85 g,碰撞加速度峰值均小于马铃薯临界损伤阈值。

(3)履带自走式分拣型马铃薯收获机采用液压驱动模式,具有较好的通过行能,可实现分离筛和分拣筛无级调速,满足丘陵山区作业或小地块的马铃薯收获作业需求。

参 考 文 献

- [1] 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)
- [2] 窦青青,孙永佳,孙宜田,等. 国内外马铃薯收获机械现状与发展[J]. 中国农机化学报,2019,40(9):206-210.
DOU Qingqing, SUN Yongjia, SUN Yitian, et al. Current situation and development of potato harvesting machinery at home and abroad[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(9): 206-210. (in Chinese)
- [3] 李涛,周进,徐文艺,等. 4UGS2型双行甘薯收获机的研制[J]. 农业工程学报,2018,34(11):26-33.
LI Tao, ZHOU Jin, XU Wenyi, et al. Development of 4UGS2 type double-row sweet potato harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 26-33. (in Chinese)
- [4] 农业农村部南京农业机械化研究所. 中国农业机械化年鉴[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2021.
- [5] 单爱军,刘俊杰,崔冰冰. 马铃薯收获机现状与发展趋势[J]. 农机化研究,2006,28(4):19-20.
SHAN Aijun, LIU Junjie, CUI Bingbing. The present situation of potato harvester and its development trends[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006,28(4): 19-20. (in Chinese)
- [6] 史明明,魏宏安,刘星,等. 国内外马铃薯收获机械发展现状[J]. 农机化研究,2013,35(10):213-217.
SHI Mingming, WEI Hongan, LIU Xing, et al. The present situation of potato harvester development at home and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(10): 213-217. (in Chinese)
- [7] 王海翼. 山地自走式马铃薯联合收获机设计与试验[D]. 昆明:昆明理工大学,2021.
WANG Haiyi. Mountain self propelled potato combine harvester design and experiment[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [8] 杨红光,胡志超,王冰,等. 马铃薯收获机械化技术研究进展[J]. 中国农机化学报,2019,40(11):27-34.
YANG Hongguang, HU Zhichao, WANG Bing, et al. Research progress of harvesting mechanization technology of potato[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(11): 27-34. (in Chinese)

- [9] 李涛,杨敏丽,张雄,等. 西北地区马铃薯机械化生产技术与差异性研究[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):307-313.
LI Tao, YANG Minli, ZHANG Xiong, et al. Potato production technology and difference of mechanization level in northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 307-313. (in Chinese)
- [10] 王学军,蒋金琳. 小型薯类联合收获机设计与田间试验[J]. 农机化研究,2014,36(2):176-178.
WANG Xuejun, JIANG Jinlin. Small potato combine harvester design and field test[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(2): 176-178. (in Chinese)
- [11] 魏忠彩,李学强,张宇帆,等. 马铃薯全程机械化生产技术与装备研究进展[J]. 农机化研究,2017,39(9):1-6.
WEI Zhongcai, LI Xueqiang, ZHANG Yufan, et al. Reviews on technology and equipment of potato production[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(9): 1-6. (in Chinese)
- [12] YANG Ranbing, YANG Hongguang, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of vertical circular separating and conveying device for potato combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 39(9): 1-6.
- [13] 吕金庆,王鹏榕,刘志峰,等. 马铃薯收获机薯秧分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(6):100-109.
LÜ Jinqing, WANG Pengrong, LIU Zhifeng, et al. Design and experiment of potato harvester stem separation equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 100-109. (in Chinese)
- [14] 李彦彬,张兆国,王圆明,等. 马铃薯收获机多级输送分离装置设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报,2021,52(6):758-768.
LI Yanbin, ZHANG Zhaoguo, WANG Yuanming, et al. Design and experiment of multistage conveying and separating device for potato harvester[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2021, 52(6): 758-768. (in Chinese)
- [15] 谢胜仕,王春光,邓伟刚,等. 摆动分离筛薯土分离机理分析与参数优化试验[J]. 农业机械学报,2017,48(11):156-164.
XIE Shengshi, WANG Chunguang, DENG Weigang, et al. Separating mechanism analysis and parameter optimization experiment of swing separation sieve for potato and soil mixture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 156-164. (in Chinese)
- [16] 蒙建国,赵祥,任其科,等. 马铃薯挖掘机分离筛动力学特性分析[J]. 农机化研究,2022,44(12):29-34.
MENG Jianguo, ZHAO Xiang, REN Qike, et al. Analysis of dynamic characteristics of potato digger separation screen[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(12): 29-34. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 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 potato harvester using double cushions for low laying separation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 140-152. (in Chinese)
- [19] 吕金庆,田忠恩,杨颖,等. 4U2A型双行马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(6):17-24.
LÜ Jinqing, TIAN Zhongen, YANG Ying, et al. Design and experimental analysis of 4U2A type double-row potato digger[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 17-24. (in Chinese)
- [20] 刘兴,杨珍,薛建,等. 马铃薯联合收获机械研究进展[J]. 农机化研究,2022,44(5):259-263,268.
LIU Xing, YANG Zhen, XUE Jian, et al. Progress of potato research combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(5): 259-263, 268. (in Chinese)
- [21] 魏宏安,张俊莲,杨小平,等. 4UFD-1400型马铃薯联合收获机改进设计与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(3):12-17.
WEI Hongan, ZHANG Junlian, YANG Xiaoping, et al. Improved design and test of 4UFD-1400 type potato combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3): 12-17. (in Chinese)
- [22] 陈小冬,胡志超,王冰,等. 单垄单行甘薯联合收获机薯秧分离机构设计与参数优化[J]. 农业工程学报,2019,35(14):12-21.
CHEN Xiaodong, HU Zhichao, WANG Bing, et al. Design and parameter optimization of sweet-potato-stalk separator for single row sweet potato combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(14): 12-21. (in Chinese)
- [23] 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 technology and equipment of potato mechanized harvest[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2021, 36(6): 1092-1103. (in Chinese)
- [24] ROGER C B. Impact testing of potato harvesting equipment[J]. American Potato Journal, 2008, 70(3): 243-256.
- [25] 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学 I[M]. 北京:高等教育出版社,2016.
- [26] 王仲仁. 弹性与塑性力学基础[M]. 2版. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.
- [27] 冯斌,孙伟,石林榕,等. 收获期马铃薯块茎碰撞恢复系数测定与影响因素分析[J]. 农业工程学报,2017,33(13):50-57.
FENG Bin, SUN Wei, SHI Linrong, et al. Determination of restitution coefficient of potato tubers collision in harvest and analysis of its influence factors[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 50-57. (in Chinese)
- [28] 韩维. 斜碰撞振动系统动力学研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2003.
HAN Wei. Dynamics of oblique-impact vibrating systems[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003. (in Chinese)

- [29] 杨海波. 弹性与塑性力学简明教程[M]. 北京:清华大学出版社,2011.
- [30] 蒙建国,王春光,谢胜仕,等. 马铃薯恢复系数测定试验分析[J]. 中国农业大学学报,2017,22(9):93-100.
MENG Jianguo, WANG Chunguang, XIE Shengshi, et al. Measurements test analysis of potato restitution coefficient[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(9): 93-100. (in Chinese)
- [31] 王相友,张蒙,李学强,等. 辊式导流马铃薯定重装袋机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(6):159-168.
WANG Xinagyou, ZHANG Meng, LI Xueqiang, et al. Design and text of roller-guided potato fixed weight bagging machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 159-168. (in Chinese)
- [32] 蒙建国. 摆动分离筛薯土分离过程中马铃薯运动特性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
MENG Jianguo. Study of kinetic characteristic during potato and soil separation on the swing separation screen[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [33] 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)
- [34] 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)
- [35] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业技术出版社,2007.
- [36] XU Rui, TAKEDA F, KREWER G, et al. Measure of mechanical impacts in commercial blueberry packing lines and potential damage to blueberry fruit[J]. Postharvest Biology & Technology, 2015, 110: 103-113.
- [37] 孙术发,任春龙,李涛,等. 基于履带式底盘的改进型森林消防车通过性[J]. 农业工程学报,2018,34(17):61-67.
SUN Shufa, REN Chunlong, LI Tao, et al. Trafficability analysis of improved forest fire engine based on crawler chassis[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(17): 61-67. (in Chinese)
- [38] 张拓. 小型山地履带底盘行驶性能仿真分析及试验研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2019.
ZHANG Tuo. Design and simulation of small crawler chassis for mountain areas[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [39] 吉旭,唐勇,林蜀云,等. 山地履带自走式辣椒收获机底盘动力学仿真与试验[J]. 中国农机化学报,2022,43(7):72-80.
JI Xu, TANG Yong, LIN Shuyun, et al. Dynamic simulation and test of the tracked chassis of the mountainous self-propelled pepper harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(7): 72-80. (in Chinese)
- [40] 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)
- [41] 魏忠彩,苏国梁,李学强,等. 基于离散元的马铃薯收获机波浪形筛面参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(10):109-122.
WEI Zhongcai, SU Guoliang, LI Xueqiang, et al. Parameter optimization and test of potato harvester wavy sieve based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 109-122. (in Chinese)

(上接第 62 页)

- [20] 任文涛,董滨,崔红光,等. 水稻种子与斜面碰撞后运动规律的试验[J]. 农业工程学报,2009,25(7):103-107.
REN Wentao, DONG Bin, CUI Hongguang, et al. Experiment on the motion characteristics of rice seeds after collision with different slopes[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 103-107. (in Chinese)
- [21] 刘彩玲,张福印,都鑫,等. 水平涡轮叶片式精量排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):165-174.
LIU Cailing, ZHANG Fuyin, DU Xin, et al. Design and experiment of precision fertilizer distribution mechanism with horizontal turbine blades[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 165-174. (in Chinese)
- [22] 都鑫,刘彩玲,姜萌,等. 倾斜梯形孔式穴施肥排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(9):43-53.
DU Xin, LIU Cailing, JIANG Meng, et al. Design and experiment of inclined trapezoidal hole fertilizer point-applied discharging device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 43-53. (in Chinese)
- [23] LIU J S, GAO C Q, NIE Y J, et al. Numerical simulation of fertilizer shunt-plate with uniformity based on EDEM software[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178(10): 105737.
- [24] CHEN H, ZHENG J, LU S, et al. Design and experiment of vertical pneumatic fertilization system with spiral Geneva mechanism[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(4): 10.
- [25] NY/T 1003—2006 施肥机械质量评价技术规范[S]. 2006.
- [26] ZHA Xiantao, ZHANG G, HAN Y, et al. Structural optimization and performance evaluation of blocking wheel-type screw fertilizer distributor[J]. Agriculture, 2021, 11(3): 248.