doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.009

多级分离缓冲马铃薯收获机设计与试验

张兆国[1,2]　王海翼[1,2]　李彦彬[1,2]　杨　曦[1,2]　IBRAHIM Issa[1,2]　张振东[1,2]
(1. 昆明理工大学农业与食品学院, 昆明 650500; 2. 云南省高校中药材机械化工程研究中心, 昆明 650500)

摘要: 针对云南山地黏土条件下马铃薯机械化收获分离效果差、明薯率低、伤薯率和破皮率较高等问题,采用多级分离振动、多重缓冲和低位侧铺的方式,设计了一种多级分离缓冲马铃薯收获机。在阐述机具整体结构及工作原理的基础上,通过理论计算确定了挖掘装置、多级分离缓冲装置、主动振动装置等主要关键部件的结构参数;建立抛送分离阶段薯土运动模型,获取微波浪形薯土分离相关技术特征;建立马铃薯筛面滑动模型,对薯块的运动特性进行理论分析,得出薯块顺流、回流的运动规律;分析土块在输送分离过程中的碰撞特性,确定了影响分离破碎效果的因素。以含杂率和土壤覆盖度为试验指标,采用二次旋转正交组合试验设计方法进行了空载试验,并利用高速摄影和三轴姿态传感器实时获取分离筛上土壤的分布状态和运动规律,结果表明,分离筛最佳工作参数组合为:一级分离筛线速度 1.42 m/s、二级分离筛线速度 2.2 m/s、侧输出线速度 1 m/s,此时土壤覆盖度 69.11%,含杂率 2.56%。在分离筛最佳工作参数组合下,以明薯率、破皮率和伤薯率为试验指标进行了田间收获试验,结果表明:当工作速度 1.05 m/s、挖掘深度 180 mm、振动强度Ⅱ级、筛面倾角 22°时,明薯率为 99.1%、破皮率为 1.41%、伤薯率为 1.32%,各项性能指标均符合国家行业标准要求。

关键词: 马铃薯收获机; 黏重板结土壤; 低位侧铺; 分离缓冲
中图分类号: S225.7　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)02-0096-14　　**OSID**:

Design and Experiment of Multi-stage Separation Buffer Potato Harvester

ZHANG Zhaoguo[1,2]　WANG Haiyi[1,2]　LI Yanbin[1,2]　YANG Xi[1,2]　IBRAHIM Issa[1,2]　ZHANG Zhendong[1,2]
(1. *College of Agriculture and Food*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*
2. *Research Center on Mechanization Engineering of Chinese Medicinal Materials in Yunnan University*, *Kunming* 650500, *China*)

Abstract: In order to solve the problems of poor separation effect, low potato-exposing rate, high damaged and bruising rate of potato mechanized harvesting under the clay in southwest mountainous area, a multi-stage separation buffer potato harvester was designed by adopting the methods of multi-stage separation vibration, multiple buffering and low-level side output. On the basis of expounding the overall structure of the machine, the design features of the main components and the operational principle, the structural parameters of the key components, such as the excavating mechanism, the multi-stage separation buffer device and the active vibration device, were determined through theoretical calculations. The motion model of potato and soil in throwing separation stage was established to obtain the technical characteristics of micro-wave potato soil separation. The potato sliding model of sieve surface and the theoretical analysis of potato tuber motion characteristics was carried out, and the motion law of potato tube downstream and back flow was obtained. The collision characteristics of soil blocks during transportation and separation were analyzed to determine the influencing factors of separation and crushing effect. In order to obtain the optimal speed parameters of each stage of separation screen in field test, taking impurity content and soil coverage as the test index, the quadratic rotary orthogonal combination experiment design method was adopted in no-load test. The real-time distribution and motion law of soil on separating sieve were obtained by using high-speed photography and three-axis attitude sensor. And the results showed that when the linear speed of the first-stage separating sieve and the second-stage separating sieve were 1.42 m/s and 2.2 m/s, and the linear speed of side output was 1 m/s, the soil coverage was 69.11% and the impurity content was 2.56%. Under the condition of the optimal speed

收稿日期: 2020-08-24　修回日期: 2020-11-12
基金项目: 云南省重大科技专项(2018ZC001-3)
作者简介: 张兆国(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备设计研究,E-mail: zzg@kust.edu.cn

parameters, taking the potato-exposing rate, bruising and damaged rate as the test index, the orthogonal harvest experiment was carried out in the field. The results showed that when the working parameters were as follows: working speed was 1.05 m/s, digging depth was 180 mm, vibration strength was grade Ⅱ and inclination angle on the sieve surface was 22°, the obvious potato rate was 99.1%, the bruising rate was 1.41%, and the damaged rate was 1.32%, which were superior to national industry standards.
Key words: potato harvester; heavy and compacted soil; low side spread; separation buffer

0　引言

我国西南地区马铃薯种植面积和产量均占全国总量的一半以上[1-3]。但西南地区马铃薯综合机械化率仅为 20.77%,其中云南省马铃薯机收率为 4.7%,远低于全国的平均水平(29.77%)[4]。

云南省马铃薯大多沿袭传统的人畜力收获方式,耗工费时。机械化收获是实现马铃薯全程机械化重要环节[5],可达到伤薯率低、漏收率低、作业效率高的目的。云南地区马铃薯种植相对集中于水资源匮乏、土质黏重板结的丘陵和山地[6-7],国内外广泛使用的中小型收获机械不能完全符合云南地区的种植农艺、适应耕地土壤类型[8],致使机械收获损伤大、分离效果差、漏挖埋薯严重等。

国内马铃薯收获主要以中小型分离筛式收获为主。其中,中型分段收获机械主要为抛掷轮式和分离筛式[9-11],二者结构相对简单,稳定性较高;小型马铃薯挖掘机主要为振动铲式,与小型拖拉机配套使用,适用于小地块、小规模收获作业。

马铃薯的损伤主要产生于分离和铺放环节,在机具作业过程中,不同类型土壤对挖掘、分离和输送形式的适配度不一,且目前存在各作业参数匹配能效不高、高效分离和薯块损伤矛盾突出等问题。现有采用多段分离工艺的马铃薯收获机,其分离筛末端的薯块未减速而直接从高处跌落,从而发生多次碰撞,这是造成薯块切线擦伤、表皮破损和内部组织损伤的主要原因[12]。

针对上述问题,结合前期研究成果[13]及农户对薯块降损减伤的需求,考虑云南省黏重板结土壤的条件,基于多级分离振动的多重减速缓冲机制和侧链输出铺放的原理,设计一种多级分离缓冲马铃薯收获机。在阐述机具整体结构和主要部件设计特点及工作原理的基础上,得出挖掘铲、分离筛和主动振动装置等关键部件的结构参数,对分离阶段的薯土混合物进行运动特性分析,对土壤破碎离散及筛分过程进行理论分析,建立土块与分离筛的碰撞模型,并通过空载试验和田间试验确定最佳工作参数组合,以有效提高多级分离缓冲马铃薯收获机在丘陵山地黏重板结土壤下的作业性能。

1　整机结构与工作原理

1.1　整机结构

根据云南省马铃薯主产区大垄双行的种植农艺和黏重板结土壤下降损减伤的实用要求,确定整机为单垄收获,样机结构如图 1 所示。主要由挖掘装置、液压缓冲减振装置、切土除蔓装置、多重缓冲分离筛、多级振动调整装置、低位侧铺装置等组成。收获机通过三点悬挂方式与拖拉机连接,工作时完成切土切蔓、被动式破碎土垡、多重缓冲分离以及低位侧铺集条等作业,作业幅宽为 900 mm。

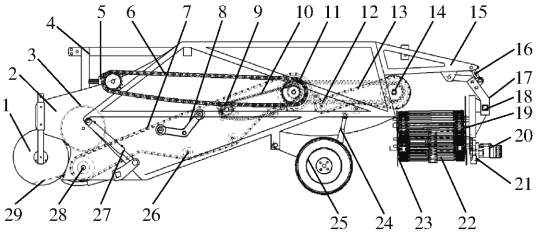


图 1　马铃薯收获机结构简图

Fig. 1　Structure diagram of potato harvester

1. 切土切蔓装置　2. 机架　3. 导流防缠绕装置　4. 三点悬挂架　5. 变速箱　6. 主传动链条　7. 一级分离装置　8. 被动振动装置　9. 主动振动装置　10. 副传动链　11. 一级主传动轮　12. 小被动轮　13. 二级分离装置　14. 二级主传动轮　15. 悬挂机架　16. 机械伸缩杆　17. 可调悬架　18. 光轴安装位置　19. 侧输出支撑后板　20. 液压马达　21. 马达限位装置　22. 侧输出分离筛　23. 侧输出支撑前板　24. 行走轮调整机构　25. 行走轮　26. 支重轮　27. 铲体调整装置　28. 被动传动轮　29. 铲体总成

挖掘装置主要由挖掘铲片、分石栅、安装铲架、铲翼和液压调整装置、土垡破碎板、连接横管等部件组成。挖掘铲尾部安装有与铲体保持同一平面的分石栅,铲体与弯刀状土垡破碎装置固定连接。切土除蔓圆盘刀由田间土壤摩擦力被动驱动,限定了挖掘宽度,并将收获过程中靠近机架一侧的垄边土壤、杂草、秧蔓等切断破碎,减少缠绕和壅堵。

多级分离缓冲装置采用二级振动筛式(图 2),由链轮带动橡胶齿驱动轮啮合分离筛杆条完成整筛驱动,橡胶轮和杆条材料均为定制耐磨损的高抗性聚氨酯和 ZGMn13 材料。针对黏重板结土壤设计了主、被动振动装置,分别给分离装置提供一定的频率和振幅,增强土壤的破碎效果,提高了整体土薯分离能力。

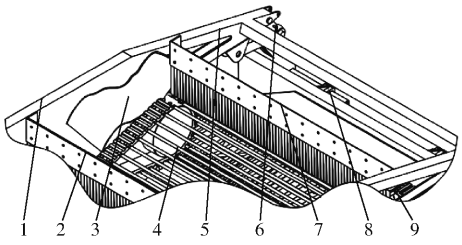


图 2 多重缓冲结构简图

Fig. 2 Multiple buffer structure diagram

1. 机架 2. 缓冲帘Ⅰ 3. 集薯板 4. 二级分离装置 5. 悬挂架 6. 机械伸缩杆 7. 缓冲帘Ⅱ 8. 侧输出装置调整机构 9. 侧输出传送装置

置于机底的挖掘装置在挖掘的同时将收后土壤平实,以便完成后续的深施肥、二季耕作等,同时方便检查薯块是否漏挖,尽量避免漏收和二次埋薯现象,提高作业指标。机架一侧设有集薯橡胶板,分离筛末端配备纵向布置的橡胶双重缓冲帘,起到降速减伤的作用,后接低位侧铺装置(图 3),缩减了马铃薯的跌落高度,减少振动和跌落过程中的碰撞冲击,以最大限度降低分离输送的伤薯率和破皮率。

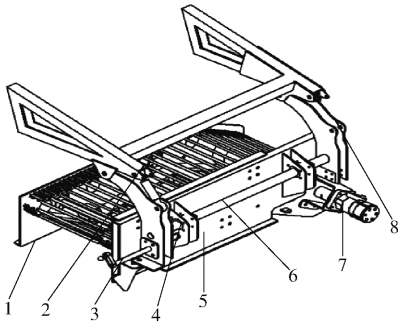


图 3 低位侧铺装置结构简图

Fig. 3 Low level side paving structure diagram

1. 前挡板 2. 机械伸缩杆 3. 曲柄摇杆 4. 固定托架 5. 后挡板 6. 光轴 7. 液压马达 8. 悬架

一、二级分离装置末端两侧均设有集薯聚拢橡胶板,以将薯块聚拢集群,避免薯块与机架发生碰撞和线性擦伤[14],薯块集拢后,缓慢通过缓冲帘Ⅰ,经二级分离装置再次分离后聚拢通过缓冲帘Ⅱ,落入侧输出输送链传送区域,最终侧铺集条于地表,便于后续的人工捡拾。

1.2 工作原理及主要技术参数

收获作业时,机具由拖拉机悬挂牵引前进,拖拉机 PTO 动力输出后经变速箱换向传递至一级主动链轴、二级主动链轮和主动振动装置传动轴。呈对称结构的切土切蔓装置将垄沟一侧的杂草、倒伏秧蔓切断,避免了后续部件因缠绕对作业的影响;挖掘铲完整掘起垄上连同残余秧蔓的薯土混合物,分石栅保持与铲体同一平面的逆时针往复运动将部分土壤破碎,并分离碎石子等小块坚硬物,保证铲片上方薯土混合物料通过,同时有效解决铲下壅土,防止分离装置与铲片间出现卡死现象;土垡破碎装置将薯土混合物中较大土垡破碎,部分碎石等从间隙内掉落,避免了输送至分离筛始端的薯土混合物中含有大量杂物对块茎和分离筛带来损伤;薯土混合物在导流橡胶板的引导下进入振动分离升运装置中,通过振动轮带动分离筛振动,将泥土与薯块分离,其中小于杆条间隙的碎土块和杂物透过分离筛面抛落田间,完成初步分离的薯块经集薯橡胶板和缓冲帘多级减速后落至侧输出装置中,经侧输出装置的集条聚拢作用将薯块聚集至未收获薯垄的垄沟外侧,完成收获过程。

根据云南省马铃薯产区的种植农艺要求,确定马铃薯收获机的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 马铃薯收获机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of potato harvester

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	3 400×1 225×1 000
整机质量/kg	860
配套动力/kW	36.7~51.5
收获垄数	1
作业幅宽/mm	900
适应垄宽/mm	≤800
挖掘深度/mm	100~260
纯工作时间生产率/($hm^2 \cdot h^{-1}$)	0.18~0.32
一级分离筛两相邻杆条中心距/mm	52
二级分离筛两相邻杆条中心距/mm	45
侧铺分离筛两相邻杆条中心距/mm	37
分离筛杆条直径/mm	12

2 关键部件设计

2.1 挖掘装置

2.1.1 结构设计

挖掘装置是直接触土部件,其主要功能是疏松垄上土壤、完整掘起薯土混合物并向后输送。挖掘铲的铲长、铲宽、铲刃倾角、入土深度、铲面倾角等都会对挖掘阻力及薯块的收获效果等产生影响。其中铲刃倾角 γ 主要作用是保证挖掘铲的自洁功能[15-16],使土壤在铲刃的滑切作用下克服挖掘时的整体阻力,保证铲面上的掘起物能够从铲面上顺利离开。有

$$\gamma < 90° - \varphi \tag{1}$$

式中 φ——土壤对钢的摩擦角,一般取 30°~36°

根据摩擦定律,理论上铲刃倾角越小,切土和划草能力越强,但取值过小会降低耐磨性,增加伤薯率和漏薯率。本设计取 $\gamma_1 = 46.8°$,6 块单铲沿轴对称均布于安装横轴上,3 个铲片分别对应单垄面,成对

两相邻铲片侧刃夹角 γ_2 为 93.6°，有利于黏重土壤的切削、破碎和减阻。

2.1.2　参数选择

根据经验，幅宽主要与马铃薯块茎地下分布情况、行距、株距、长势和机具行走路线偏差等有关[17-18]。为确保掘起整条薯垄内的薯土混合物，挖掘装置作业的有效工作幅宽 S 应略大于垄底宽度，薯类收获机挖掘铲工作幅宽计算式为

$$S = M + b + 3\varepsilon + 2c \tag{2}$$

其中

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_M^2 + \varepsilon_b^2} \tag{3}$$

式中　M——平均行距，mm

b——马铃薯平均分布宽度，mm

ε——综合标准差，mm

c——机器行驶偏差，取 50 ~ 80 mm

ε_M——行距标准差，mm

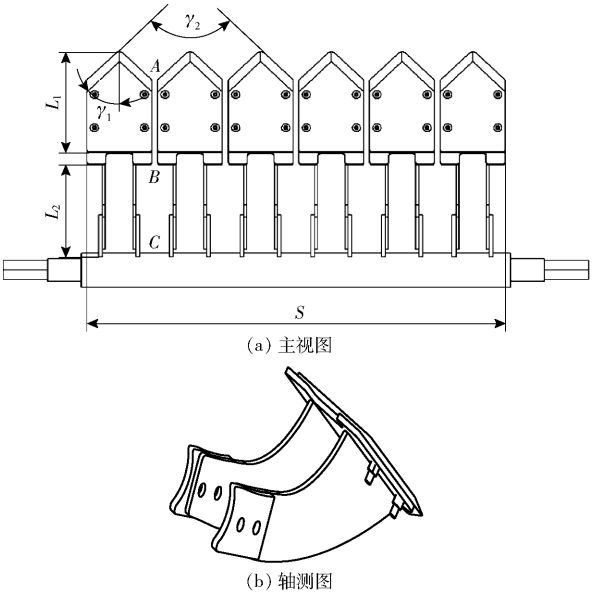
ε_b——薯块分布宽度标准差，mm

结合垄底宽 900 mm 的农艺要求，取挖掘铲组有效工作宽度 S = 946 mm。

挖掘装置结构简图如图 4 所示，挖掘装置由铲体和土垡破碎板两段组成，挖掘装置分为前段长度 L_1 和后段长度 L_2，L_1 由铲面倾角 δ（取 15°）及平均挖掘深度 h_1（取 140 ~ 180 mm）决定，计算式为

$$L_1 = \frac{h_1}{\sin\delta} \tag{4}$$

挖掘装置后段长度 L_2 由能量守恒定律求得：设掘起物沿铲面以机具前进速度运动到 B 点后，继续沿着铲面上升到末端 C 点时，处于静止状态，速度为零，此时土壤开始膨胀松散、呈集堆状向铲的两侧散落，马铃薯块茎随着土壤的脱落逐渐显露在铲面上。土薯混合物的动能（B 点）在整个过程中全部



（a）主视图

（b）轴测图

图 4　挖掘装置结构简图

Fig. 4　Diagram of structure of excavating device

用于克服挖掘铲 AC 段的摩擦功 W_f 及混合物上升的重力势能 W_G，有

$$W_f = Rt_w g\varphi L_2 = mgL_2 t_w g\varphi\cos\delta \tag{5}$$

$$W_G = mgh_2 = mgL_2\sin\delta \tag{6}$$

式中　R——挖掘铲对土壤的反作用力，N

t_w——掘起物在铲面的运动时间，s

m——薯土混合物质量，kg

g——重力加速度，m/s^2

h_2——后段挖掘深度，mm

土薯混合物通过 BC 段的能量守恒方程为

$$\frac{mv_w^2}{2} = mgL_2\tan\varphi\cos\alpha + mgL_2\sin\delta \tag{7}$$

式中　v_w——掘起物在铲面运动速度，m/s

化简得

$$L_2 = \frac{v_w^2\cos\delta}{2g\sin(\delta+\varphi)} \tag{8}$$

总长度为

$$L = L_1 + L_2 = \frac{h_1}{\sin\delta} + \frac{v_w^2\cos\delta}{2g\sin(\gamma+\varphi)} \tag{9}$$

为了有效减少壅土现象，在挖掘铲后装配土垡破碎板，土薯混合物在破碎板上被劈裂、剪切、弯折[19]，使土薯混合物能够有效地输送至分离装置上，使分离更充分，降低振动分离的功耗，达到更好的土薯分离效果。

2.2　多级分离缓冲装置

2.2.1　结构设计

多级分离缓冲装置主要由一级分离筛、主动振动装置、被动振动装置、一级支重胶轮、一级主动轮、二级振动装置、二级支重胶轮、二级主动轮、缓冲帘Ⅰ、缓冲帘Ⅱ等组成，输送分离段局部结构图如图 5 所示。

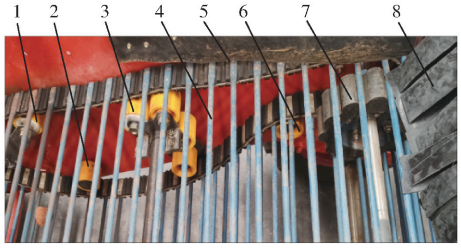


图 5　振动输送分离段局部结构图

Fig. 5　Local structure of vibration conveying separation section

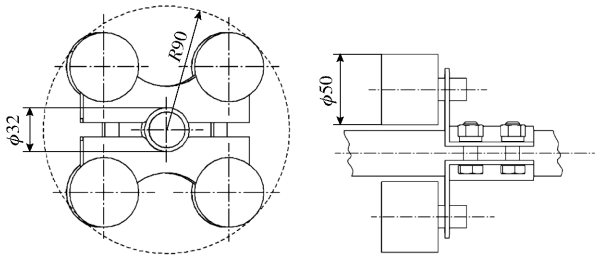
1. 被动振动装置　2. 张紧轮　3. 一级主振动装置　4. 一级分离筛　5. 集薯板　6. 支重轮　7. 一级主动轮　8. 缓冲帘Ⅰ

主振动装置高频低幅周期性振动，冲击黏重板结土块并将其击碎后离散抛解，同时保证薯块被“弹起”的不致于太高，运用“微波浪”筛形缓冲降低薯块跌落高度，减少破皮率和线性擦伤。在拖拉机动力输出供给下，分离后的薯土混合物在振动装置

的作用下保持良好的整体流动性,在土薯混合物的运移过程中有效减少了“薯-土”、“薯-薯”、“薯-机械”之间的碰撞摩擦次数,并将薯块胶质层破裂和机械损伤控制在可接受范围内。

实测云南省马铃薯薯块的三轴尺寸分布区间为 30 ~ 180 mm,为保证一级分离装置的支承和分离效果,设计杆条直径为 12 mm,两相邻杆条中心距取为 52 mm。分离装置采用“整带单条筛 + 双级可调振动”的形式,分离筛总长 3 600 mm,有效工作行程 1 600 mm,有效工作宽度 860 mm,分离筛的倾角可调范围为 7° ~ 22°,工作状态下分离筛倾角可通过拖拉机液压装置改变与三点悬挂装置的相对位置或者通过机架一侧支重轮孔位进行调整。一般薯土分离装置施加于分离筛的振动频率为 3 ~ 8 Hz[20],结合分离筛对黏重板结土壤分离技术要求和工作速度,经计算确定振动频率为 10 Hz。

主动振动装置为独立安装的成对四滚子式结构(图 6),利用 GB/T 5783—2000 六角头螺栓将其紧固,并保证滚子能绕自身固定轴转动。考虑到本文马铃薯收获作业条件为黏重板结土壤,颗粒粘结力大,板结程度高,为增强土壤破碎能力,提高分离效果,取主动振动装置的振幅范围为 15 ~ 60 mm[21],根据频率和土壤特征确定振幅为 35 mm。考虑安装孔位和固定振幅的要求,设定滚子直径为 50 mm,工作圆周半径为 90 mm,主动振动装置有效工作圆周(外切圆)直径为 230 mm。根据杠杆原理,将被动振动装置安装在分离装置中心,通过支反力的作用提高分离筛在振动过程中的整体平顺性与稳定性。



(a) 主视图 (b) 左视图

图 6 主动振动装置结构简图

Fig. 6 Structure diagrams of active vibration device

二级分离筛的作用是提高黏重板结土壤的离散效果,将薯土混合物进行二次分离与输送。二级分离装置仅依靠驱动轮完成波浪式振动,不设置主动振动部件,以节省能耗、减少损伤。其工作参数为:输送宽度 860 mm,工作长度 900 mm,设计栅条输送杆条中心距为 42 mm,输送杆条直径 12 mm。

2.2.2 薯土分离段参数确定

薯块在分离筛上的运动状态如图 7 所示,其运动方式为多次“弹起”、“跌落”,分离筛的具体参数影响到薯块的碰撞恢复系数和损伤程度。若跌落高度太大,跌落瞬时的冲击和碰撞易使薯块产生内部损伤和切线擦伤。

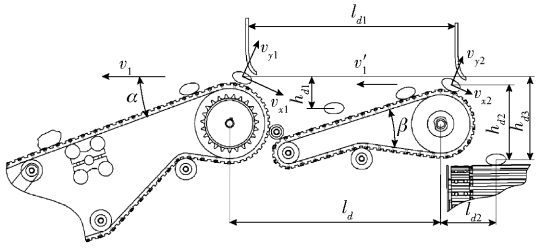


图 7 薯土分离段运动分析

Fig. 7 Movement analysis of potato soil separation section

将整体分离段分为缓冲段和侧铺段。缓冲帘由多块纵向垂布的 3 mm 加厚减震缓冲硅胶板排列组成,一、二级分离筛两端连接带弯折处均设有驱动橡胶链轮,以驱动分离筛运行,一级分离筛橡胶传动轮的分度圆直径分别为 240 mm 和 160 mm,二级分离筛橡胶传动轮的分度圆直径分别为 200 mm 和 74 mm。作业时,薯块发生斜抛运动,主振动装置滚子以“简谐运动”的方式往复交替击打筛面,为便于分析,将整个运动过程简化为平面抛物线运动,薯块在缓冲段的运动方程为

$$l_{d1} = v_1 t_1 \cos\alpha = \sqrt{v_{y1}^2 + v_{x1}^2}\, t_1 \cos\alpha \tag{10}$$

式中 l_{d1}——薯块二级分离缓冲段水平位移,mm

v_1——一级分离装置筛面运行速度,m/s

t_1——薯块自一级分离筛至缓冲帘Ⅱ运动时间,s

α——一级分离筛筛面倾角,(°)

v_{y1}——薯块通过二级分离缓冲段的 y 方向分速度,m/s

v_{x1}——薯块通过二级分离缓冲段的 x 方向分速度,m/s

马铃薯薯块运动到一级分离筛末端时,其主要动力来源为一级主动轮的匀速驱动,为便于计算分析将分速度 v_{y1} 近似地看为零,即 $v_1 \approx v_{d1}$,代入式(10)并推理得

$$l_{d1} = v_{d1} t_1 \cos\alpha = \frac{n_{d1} \pi t_1 \cos\alpha}{60} \tag{11}$$

$$h_{d1} = v_{d1} t_1 \sin\alpha - \frac{g t_1^2}{2} = \frac{n_{d1} \pi \varphi_{d1} t_1 \sin\alpha}{60} - \frac{g t_1^2}{2} \tag{12}$$

$$t_1 = \frac{\pi n_{d1} \varphi_{d1} \sin\alpha + \sqrt{\pi^2 n_{d1}^2 \varphi_{d1}^2 \sin^2\alpha + 2 g h_{d1}}}{g} \tag{13}$$

式中 v_{d1}——一级主动传动轮运行线速度,m/s

n_{d1}——一级主动传动轮转速,r/min

h_{d1}——薯块由缓冲帘Ⅰ至二级分离筛上方跌落高度,mm

φ_{d1}——一级主动传动轮分度圆直径,mm

同理，薯块由二级分离筛筛面倾角 β 的减速提升，经过缓冲帘Ⅱ后由分离筛跌落至侧铺段的运动方程为

$$l_{d2}=v_{d2}t_2\sin\beta=\frac{n_{d2}\pi\varphi_{d2}t_2\sin\beta}{60} \tag{14}$$

$$h_{d2}=v_{d2}t_2\cos\beta-\frac{1}{2}gt_2^2=\frac{1}{60}n_{d2}\pi\varphi_{d2}t_2\cos\beta-\frac{1}{2}gt_2^2 \tag{15}$$

$$t_2=\frac{\pi n_{d2}\varphi_{d2}\cos\beta+\sqrt{\pi^2n_{d2}^2\varphi_{d2}^2\cos^2\beta+2gh_{d2}}}{g} \tag{16}$$

$$\tan\beta=h_{d2}/l_d \tag{17}$$

式中　l_{d2}——薯块侧铺段跌落水平位移，mm

v_{d2}——二级主传动轮运行线速度，m/s

t_2——薯块自缓冲帘Ⅱ跌落至地表运动时间，s

n_{d2}——二级主传动轮转速，r/min

h_{d2}——薯块由缓冲帘Ⅰ至二级分离筛上方跌落高度，mm

φ_{d2}——二级主传动轮分度圆直径，mm

l_d——两分离筛主传动轴之间水平距离，mm

为保证良好的分离缓冲和低位铺放效果，在式(10)～(17)理论计算的基础上，结合云南省马铃薯块茎的具体三轴尺寸，根据实际工作状态下分离筛运行线速度一般在 1.2～2.0 m/s 之间的行业标准[22]，选定缓冲帘原材料为 3 mm 厚减震缓冲胶垫，缓冲帘Ⅰ整帘由 12 块长度 360 mm、宽度 75 mm 的胶垫纵向垂列，缓冲帘Ⅱ由 14 块长度 420 mm、宽度 65 mm 的胶垫纵向垂列。缓冲帘旨在缩短薯块的抛物行程，降低跌落高度，减少薯块损伤，达到缓冲减速、降损减伤的目的。为确定适当的缓冲帘布置位置，以有效避免跌落高度过高带来的碰撞损伤和过低带来的杆条撞击，在保证分离筛的运行速度满足末端薯块弹起时的抛物行程的水平位移的前提下，将缓冲帘Ⅰ、Ⅱ布置在圆周末端正上方位置，通过调整板与机架最高点连接。确定两缓冲帘之间的横向间距 $l_{d1}=700$ mm。保持主传动驱动轴Ⅰ中心与主传动驱动轴Ⅱ中心处于同一水平线，之间的水平距离为 $l_d=750$ mm，选取低位铺放段分离筛倾角为 25°。以保证足够合适的薯块斜抛行程，避免薯块因斜抛行程不足而直接跌落至杆条上，或因薯块斜抛行程过大，造成薯块由缓冲帘Ⅱ跌落至侧铺段后的大冲击和与连续抛出的薯块发生堆积壅堵的现象，大大降低薯块损伤。

在马铃薯收获机田间试验的基础上，选取拖拉机转速 $n=540$ r/min 进行后续计算，确定变速箱直齿圆锥齿轮传动比为 $i_1=2.66$，通过变速箱将拖拉机传动轴纵向动力转向为横向动力并通过 ST12A 链条传递到一级分离装置，经计算确定一级分离筛的传动比为 $i_2=1.88$，为保证二级分离筛的主动轮转速与一级筛的主动轮转速一致，取二级分离筛传动比 $i_3=1$。

2.2.3　微波浪形薯土分离技术特征

作业时，薯土混合物在分离装置上实现“薯-土-杂”的提升输送、振动破碎、集拢分离和碎土碎石分离，经缓冲帘Ⅰ减速缓冲除杂后，跌落至二级分离装置后进一步破碎分离，经缓冲帘Ⅱ和集薯板的双重缓冲作用后最终将薯块抛送至后段侧铺装置上。在主动振动装置和被动振动装置的多次作用下，薯土混合物在分离筛上完成多次“跃动”，并在摩擦力作用下向后输送。

为便于分析，忽略分离装置运行速度与机具前进速度之间由于滑动等引起的速度差异，二者满足关系

$$\frac{v'}{v_0}=\lambda \tag{18}$$

式中　λ——速度系数，取 0.8～2.5

v'——分离装置上筛面运行速度，m/s

v_0——机具前进速度，m/s

主传动轮和支重轮 1 转速与分离装置运行速度 v_{p1} 之间的关系满足

$$v_{d1}=\frac{n_{d1}\pi\varphi_{d1}}{60} \tag{19}$$

$$v_{p1}=\frac{n_{p1}\pi\varphi_{p1}}{60} \tag{20}$$

$$v'=v'' \tag{21}$$

式中　φ_{p1}——支重轮 1 分度圆直径，mm

v''——分离装置下张紧筛面运行速度，m/s

n_{p1}——支重轮 1 转速

为起到降损减伤的作用，薯土分离装置工作时采取高频低幅的振动方式进行分离，分离筛在主动振动装置滚子的往复激励下进行上下方向的微波浪形抖动，迫使土块破碎分离，并抖落小块土壤、秧蔓和其他杂质[23]。薯土混合物在分离筛上的运动形式为正向顺流或反向回流，当筛面倾角 α 大于薯土混合物与分离栅条的摩擦角时，产生回流现象，进而增加薯块与薯块、筛面、土壤、杂物等的相互碰撞次数，易产生反复多次的动态损伤、切线擦伤和疲劳累积损伤等；反之，若分离筛倾角 α 过小，为了保证薯土混合物顺流时达到同等的分离效果，需加长分离筛，这会增加薯块在筛面的抖动分离时间，增加薯块的摩擦碰撞次数，因此设计两级缓冲分离筛，在保证分离输送的同时达到减损的目的。

薯土混合物运动特征如图 8 所示,分离技术特点为多级振动碎土、微波浪形薯土分离。工作时,前段设置的主、被动振动装置用于增加振动强度,将具有一定粘附力的黏重板结土块破碎,同时提高了运移阶段碎土和秧蔓等杂物的透筛效率。分离筛工作时,筛面的薯土分离过程主要表征为 3 段波浪形,在完成土块破碎分离的同时,将薯块不断向后输运,利用“波峰波谷”之间的运移高度差实现大土块的翻滚、破碎和分离。

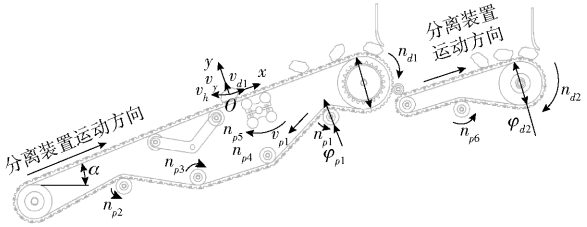


图 8 缓冲段薯土混合物运动特征

Fig. 8 Movement characteristics of potato soil mixture in buffer zone

一级分离筛空载状态运动截图如图 9 所示。筛面整体在张紧轮和支重轮的限制下维持微波浪形结构并持续运转,分离筛运动时可分为无振动、振动顶起、振动凹沉 3 个阶段。分离筛刚运转的瞬间,被动振动装置的滚子与分离筛接触,主动振动装置滚子与分离筛面未接触处于悬停状态,分离筛表面呈斜线状;运动后,分离筛面与主振动装置滚子高点接触呈顶起状态,此时由斜线状过渡为折线波浪状进行输送分离,并在主传动轮的带动下完成斜线向折线的连续交替分离过程转换。

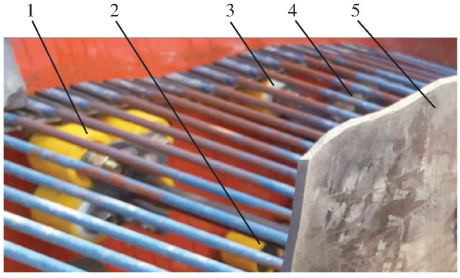


图 9 分离筛空载状态运动截图

Fig. 9 Screen shot at no load state

1. 一级主振动装置 2. 张紧轮 3. 支重轮 4. 分离筛 5. 集薯板

相对于仅依靠主动振动装置进行周期性骤变激励的分离筛而言,微波浪形分离配合多重缓冲可有效避免单纯激振带来的薯块瞬态损伤,充分减少杆条的碰撞冲击,有效减少冲击力对薯块皮下组织传递的能量,故有利于降损减伤。进一步分析可见,由于云南省土质较为黏重板结,相比平原沙质土壤需更长的分离长度,在机架长度固定的前提下,微波浪形分离筛有效加长了分离工作长度。另外,通过机架安装孔位的调整来调整峰谷高差,并结合具体的工况要求调整分离筛的张紧位置和有效分离长度,从而可调整振动等级。

2.3 低位侧铺装置

为解决传统马铃薯收获机分离筛后端直接集薯条铺的二次埋薯和薯面粘附物分离不彻底的问题,设计了低位侧铺装置,将马铃薯块与残留物进行三级分离,并将缓冲后的薯块侧向集条铺放于未收获的垄沟一侧,有效避免了铺放过程二次埋薯现象,提高了后续人工捡拾的效率,减少漏捡和踩踏。装置主要结构如图 3 所示,装置整体与主机架相连,在机械伸缩限位杆保证水平度的前提下,由左右横移调节机构,满足不同垄沟间距条件下薯块平稳铺放于垄沟一侧。侧铺装置选用 MBRS160 型低转速高扭矩液压马达驱动,额定扭矩为 320 N·m,工作油压 12.5 MPa,在流量 30 L/min 下转速为 120 r/min,额定功率为 12.5 kW。

低位侧铺装置主要由张紧支重轮限定输送筛形成水平输送分离段和倾斜下铺段。侧铺分离筛在液压驱动下,使得薯块表面的附着物被相邻杆条缓慢搓擦,并将受到搓擦的土块和残留杂物从空隙中抽离,同时压碎稍大的土块,完成土块和其余杂物的清理分离。

为增加机具对作业工况的适应能力,在共用液压调速阀的基础上设计了挖掘装置调整机构(图 10),该机构主要包括液压缸、调速阀、安装机架、挖掘装置调整臂、换向阀等,作业需要时,由液压缸控制调整臂来调整挖掘装置的入土深度和角度。同时液压调整机构可实现后段低位侧铺装置多级转速调整和换向传动。

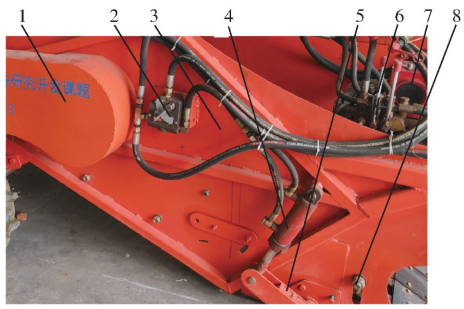


图 10 液压调整机构

Fig. 10 Hydraulic adjustment mechanism

1. 传动装置保护罩 2. 调速阀 3. 机架 4. 液压缸 5. 挖掘装置调整臂 6. 换向阀 7. 传动箱 8. 一级分离筛调整装置

3 运动特性分析

马铃薯薯块在分离筛上的运动形式分为正向顺流和反向回流,分离装置工作过程中薯块存在相互挤压、碰撞以及翻滚跳跃等随机运动。为分析方便,忽略马铃薯的弹性、残余根系的牵连及空气阻力的

影响；忽略马铃薯之间的相互挤压、碰撞及自身的翻滚，将薯块个体视为质点[24]。采用不同的结构参数和作业参数会有相应的不同分离效果，因此从运动学和动力学角度分析分离装置薯土分离的相关特性，对于提高分离装置性能非常关键。

3.1　马铃薯筛面滑动分析

一级分离装置上配备了主、被动振动装置，在振动装置的作用下，对筛面上的薯土混合物进行抛散，在振动装置滚子的双重激振作用下，筛面保持微波浪形状态持续运转，为达到向后运输物料的目的，以薯块质心为坐标原点、分离筛运转方向为 x 轴正方向、筛面法线方向为 y 轴正方向建立坐标系，对一级分离筛上薯块进行受力情况分析，如图 11 所示。

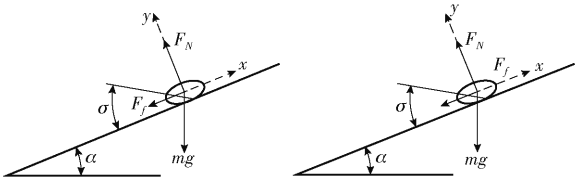


图 11　薯块相对分离筛顺流和回流受力分析

Fig. 11　Stress analysis chart of potato chips relative to separation screen

得出马铃薯薯块在正方向顺流的动力学方程为

$$m(a_{x1,2}+a_x)=mg\sin\alpha\mp F_f \tag{22}$$

$$ma_y=F_N-mg\cos\alpha \tag{23}$$

$$F_f=\mu F_N \tag{24}$$

式中　$a_{x1,2}$——马铃薯薯块相对一级分离筛顺、回流时的加速度，m/s^2

a_x——一级分离筛 x 轴上的加速度分量，m/s^2

a_y——一级分离筛 y 轴上的加速度分量，m/s^2

μ——马铃薯块与筛面滑动摩擦因数，取 0.35

F_f——马铃薯与筛面摩擦力，N

F_N——筛面对马铃薯的支持力，N

$$v=r\omega\cos(\omega t) \tag{25}$$

$$a=-r\omega^2\sin(\omega t) \tag{26}$$

式中　v——一级分离筛线速度，m/s

a——一级分离筛加速度，m/s^2

r——主振动装置分度圆半径，mm

ω——主振动装置角速度，rad/s

t——薯块运动时间，s

加速度在 x、y 轴上的分量分别为

$$a_x=-r\omega^2\sin(\omega t)\cos(\alpha+\sigma) \tag{27}$$

$$a_y=-r\omega^2\sin(\omega t)\sin(\alpha+\sigma) \tag{28}$$

式中　σ——分离筛振动方向角，(°)

在式(22) ~ (28)中代入一级分离筛的结构参数：$r=120$ mm，$\omega=21.4$ rad/s，$\alpha=15°$，$\sigma=22°$。通过计算分析，马铃薯相对分离筛开始正向顺流的瞬间 $a_x=g\sin\alpha+F_f/m$，反向回流的瞬间 $a_x=g\sin\alpha-F_f/m$，由此可得薯块正向顺流的理论时间段为(t_1，t_2)，薯块反向回流的理论时间段为(t_3，t_4)。理论上薯块在筛面上的运动是连续性的或间断性的：若顺流起始时刻 t_1 小于回流起始时刻 t_3，即筛面上顺流时段(t_1，t_2)内薯块不发生回流现象，则筛面上薯块运动是间断的，薯块相对分离筛静止相当时间段后在 t_3 时刻开始回流；若实际顺流时间区(t_1，t_2)与回流时间区(t_3，t_4)存在交叉，则薯块回流开始瞬间为顺流结束瞬间，筛面上薯块运动是连续的；反之，若回流起始时刻 t_3 小于理论顺流起始时刻 t_1，则回流优先于顺流，回流时间区(t_3，t_4)内不发生顺流，即薯块相对分离筛静止一段时间后在 t_1 时刻开始顺流，薯块流动是间断的；若实际顺流时间区(t_1，t_2)与回流时间区(t_3，t_4)存在交叉，则薯块结束回流瞬间即开始顺流，筛面上薯块运动是连续的。

经计算，马铃薯块在分离筛面上顺流优先于回流，根据式(22) ~ (28)计算，并对时间积分可求得顺流和回流的速度表达式分别为

$$v_{xs}=-r\omega(\cos(\alpha+\sigma)+\mu\sin(\alpha+\sigma))(\cos(\omega t)-\cos(\omega t_1))-g(\mu\cos\alpha-\sin\alpha)(t-t_1) \tag{29}$$

$$v_{xh}=-r\omega(\cos(\alpha+\sigma)-\mu\sin(\alpha+\sigma))(\cos(\omega t)-\cos(\omega t_3'))-g(\mu\cos\alpha+\sin\alpha)(t-t_3') \tag{30}$$

式中　v_{xs}——薯块相对筛面顺流速度，m/s

v_{xh}——薯块相对筛面回流速度，m/s

t_3'——薯块开始回流的实际时间，s

代入分离筛结构和工作参数，对应的薯块开始顺流时刻 t_1 时 $a_x=g\sin\alpha+F_f/m$，薯块相对筛面做加速顺流，由于 $a_x<g\sin\alpha+F_f/m$，t_2 时刻薯块速度达到峰值，t_3 时刻加速度再次为 $a_x=g\sin\alpha+F_f/m$，之后薯块保持 $a_x>g\sin\alpha+F_f/m$ 做减速运动，直至停止；反向回流的瞬间 $a_x=g\sin\alpha-F_f/m$，此时实际为 t_3' 时刻，该点薯块回流速度最大，之后做 $a_x<g\sin\alpha-F_f/m$ 的减速运动，直至速度为零时刻，即继续顺流运动。由理论计算和时段分析，分离筛运行速度和筛面倾角是薯块筛面滑动形式的最主要影响因素，马铃薯薯块筛面上的顺流距离远大于回流距离，该分离筛参数满足继续向后输送分离的要求。

3.2　土块与分离筛碰撞过程分析

分离筛对薯土混合物的分离主要包括 2 个阶段：薯土混合物从挖掘装置过渡到一级分离筛面上随筛面升运和抛离筛面的运动，土垡受到栅条剪切、离散等作用而破碎落筛；薯土混合物由一级分离筛跌落至二级分离筛瞬间，土块冲击栅条并碰撞筛面抛离筛面，实现二次破碎分离。

以土块质心为原点建立坐标系，土块与分离筛

碰撞过程如图 12 所示。

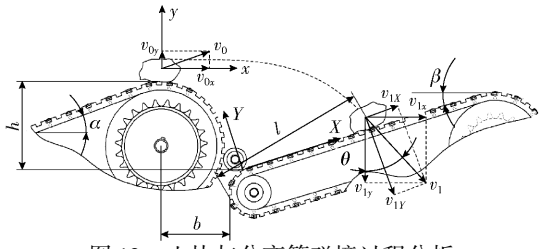


图 12 土块与分离筛碰撞过程分析

Fig. 12 Analysis of collision process between soil block and separation screen

土块运动至一级分离筛顶端时刻开始做初速度为 v_0的抛物运动,忽略空气阻力的影响,土块在 x 方向运动速度不变,在 y 方向做初速度为 v_{0y}的加速运动,t 时间后与分离筛面产生碰撞冲击,则其与分离筛面的碰撞速度为

$$v_1 = \sqrt{v_{1x}^2 + (v_{0y} - gt')^2} \tag{31}$$

其中 $v_{1x} = v_{0x} = v_0\cos\theta \quad v_{0y} = v_0\sin\theta$

式中 v_1——薯土混合物与二级分离装置碰撞速度,m/s

v_{1x}——碰撞速度在 x 方向分量,m/s

v_{0y}——初速度在 y 方向分量,m/s

t'——土薯混合物抛物运动时间,s

据此可求得碰撞速度 v_1与分速度 v_{1y}的夹角

$$\theta = \arcsin\frac{v_{1x}}{v_1} \tag{32}$$

土块的位移方程为

$$\begin{cases} h + l\sin\alpha = \dfrac{1}{2}gt_0'^2 - v_{0y}t_0' \\ l\cos\alpha + b = v_{0x}t_0' \end{cases} \tag{33}$$

式中 h——土块起抛点与二级分离筛前端之间的垂直距离,mm

l——土块落筛点与分离筛的距离,mm

t_0'——土薯混合物总运动时间,s

b——主动链轮中心与二级分离筛前端的水平距离,mm

土块碰撞速度 v_1在 y 方向的分量为

$$v_{1y} = -v_1\cos(\alpha + \theta) \tag{34}$$

式中 v_{1y}——土块碰撞速度 v_1在 y 方向分量,m/s

假设土块与分离筛发生完全非弹性碰撞,碰撞瞬间分离筛在 y 轴正方向的分量最大,则土块与分离筛在 y 轴方向的碰撞冲量 I 为

$$I = m_t(v_{y\max} - v_{1y}) \tag{35}$$

其中 $v_{y\max} = k_2 r\omega\sin(\beta + \alpha)$

式中 m_t——土块质量,kg

$v_{y\max}$——最大筛面速度在 y 方向分量,m/s

k_2——二级分离筛 y 方向加速度修正系数,取 3

土块与分离筛的碰撞冲量越大,土块破碎程度越高,土薯分离效果越明显,土块与分离筛间的碰撞冲量与筛面倾角呈二次函数的关系,薯土混合物由一级分离筛末端跌落二级分离筛面瞬间,较大的筛面倾角更有利于土块的破碎分离。

4 试验与结果分析

4.1 试验条件

样机由云南省玉溪市新天力农业装置制造公司制造,于 2020 年 1 月在云南省文山州砚山县平远镇蒲草村进行空载试验研究,2020 年 5 月开展田间收获试验。试验地海拔为 1 473 m,属中亚热带气候,年平均日照时数为 1 937.8 h,年平均降水量 937.7 mm,年平均气温 21.7℃,年均无霜期 340 ~ 362 d,光照充足,地势平坦,适宜于马铃薯生长及种植,耕作层深度为 12 ~ 18 cm,种植模式为大垄双行式垄作,垄形参数为:垄高 200 ~ 240 mm、垄顶宽 800 mm、垄底宽 900 mm、垄间距 1 200 mm、垄上行间距为 300 ~ 400 mm,株距 280 ~ 350 mm。为验证黏重板结土壤下马铃薯的收获效果和损伤效果,不对薯垄进行杀秧处理,不清理田间的滴灌带和薄膜等杂物。测得 0 ~ 200 mm 薯垄土壤含水率为 11.54% ~ 13.25%,0 ~ 15 cm 土壤坚实度为 0.56 MPa,15 ~ 30 cm 土壤坚实度为 0.78 MPa。其他试验设备有:东方红-704 型轮式拖拉机、合肥富煌君达高科信息技术有限公司生产的千眼狼 5F01M 型高速摄像机、维特 BWT901CL 型智能姿态传感器、XCC-988 型电子秤、奇克 QC 型高级钢卷尺、米尺、浙江托普公司生产的土壤坚实度仪和土壤含水率仪。

4.2 空载试验

4.2.1 试验方法

由理论分析可知,分离筛运行速度对薯土混合物在筛面上的滑动形式、分离效果以及筛面有效覆盖面积均有影响,为判断追踪薯块(土块)与筛面的滑动方式和筛面物料分布情况,确定三级分离筛运行速度的最佳工作组合参数,并以最佳速度组合参数作为田间作业参数,采用二次旋转正交组合试验设计方法安排试验,以一级分离筛线速度(0.44 ~ 2.4 m/s)、二级分离筛线速度(0.6 ~ 2.2 m/s)、侧输出线速度(0.4 ~ 1.6 m/s)为试验因素;以含杂率和土壤覆盖度为试验指标。采集各因素下分离筛位姿变化参数及对应的土块相对分离筛运动的高速影像数据。试验中选取的机器前进速度较正常工作时低,主要因为较低的机器前进速度可使落至分离筛的物料量较少,为有效捕捉马铃薯相对分离筛的运动影像提供便利。通过控制拖拉机油门调节动力输

出轴转速，结合变速箱能够调节分离筛线速度；通过调节液压调整装置调节侧输出装置线速度。用支架将摄像机固连于收获机机架上，斜向并调整摄像机高度使之能够以一定角度捕捉到整个分离筛上土块分布的画面。试验时，使高速摄像机处于待记录状态，启动拖拉机至平稳运转后，启动高速摄像机开始记录分离筛上土块的分布状况，结合马铃薯相对分离筛运动特性和薯土混合物覆盖度的变化规律，剖析分离筛参数对分离筛性能产生影响的机理。随机采集 10 m 稳定测试区内土壤进行试验，记录数据后完成一次测试。通过试验结果对影响试验指标的因素进行显著性分析，根据实际需求及前文中确定的参数范围，最终获得较合适的各因素组合。

试验因素编码如表 2 所示，试验方案及结果如表 3 所示。

表 2　试验因素编码

Tab. 2　Experimental factors and codes

编码	因素		
	一级分离筛线速度 x_1/(m·s^{-1})	二级分离筛线速度 x_2/(m·s^{-1})	侧输出线速度 x_3/(m·s^{-1})
1.682	2.40	2.20	1.60
1	2.00	1.88	1.36
0	1.42	1.40	1.00
−1	0.84	0.92	0.64
−1.682	0.44	0.60	0.40

4.2.2　试验结果分析

除上述 3 个因素外，设定其他因素保持不变，按照试验要求完成试验数据统计与分析，其试验结果如表 3 所示。含杂率指一次试验完成后由低位侧铺装置输出的包括碎土在内的杂质质量百分比；借鉴生态学中植被覆盖度的概念[25]，定义分离筛上土壤覆盖度为：土壤在分离筛面的垂直投影面积占分离筛总面积的百分比。利用高速摄影连续垂向拍摄筛面上土壤的分布状态图像。试验完成后利用 Matlab 解译所选图像范围的像素数量，读取计算直方图的像素数量 w，分离筛上土壤覆盖度计算式为

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i}{w} \times 100\% \tag{36}$$

式中　η——分离筛上土壤覆盖度，%

w_i——第 i 块土壤的像素数量

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行二次回归分析，并进行多元回归拟合，得到含杂率 Y_1 和土壤覆盖度 Y_2 的回归方程，并进行显著性检验。通过对试验数据的分析，对比不同因素水平下

表 3　试验方案与结果

Tab. 3　Experimental scheme and results

序号	因素			含杂率 Y_1/%	土壤覆盖度 Y_2/%
	x_1/(m·s^{-1})	x_2/(m·s^{-1})	x_3/(m·s^{-1})		
1	0.84	0.92	0.64	5.24	70.28
2	2.00	0.92	0.64	3.81	53.29
3	0.84	1.43	0.64	3.26	69.91
4	2.00	1.43	0.64	2.59	51.86
5	0.84	0.92	1.36	3.92	71.23
6	2.00	0.92	1.36	3.87	52.19
7	0.84	1.43	1.36	3.12	70.92
8	2.00	1.43	1.36	2.86	50.64
9	0.44	1.40	1.00	3.46	74.98
10	2.40	1.40	1.00	2.68	38.67
11	1.42	0.60	1.00	4.29	66.56
12	1.42	2.20	1.00	2.56	69.11
13	1.42	1.40	0.40	3.45	65.17
14	1.42	1.40	1.60	3.63	61.25
15	1.42	1.40	1.00	3.28	60.86
16	1.42	1.40	1.00	3.49	68.12
17	1.42	1.40	1.00	3.45	65.93
18	1.42	1.40	1.00	3.48	66.31
19	1.42	1.40	1.00	3.41	63.27
20	1.42	1.40	1.00	3.28	64.14
21	1.42	1.40	1.00	3.51	67.77
22	1.42	1.40	1.00	3.47	62.84
23	1.42	1.40	1.00	3.38	63.21

含杂率和土壤覆盖度。分别进行方差分析，结果如表 4 所示。x_1、x_2 对含杂率 Y_1 的影响极显著（$P < 0.01$）；x_1 与 x_3 之间的交互、x_2 与 x_3 之间的交互对含杂率 Y_1 的影响显著（$0.01 < P < 0.05$）；一级分离筛线速度 x_1 的二次项对含杂率 Y_1 的影响较显著（$0.05 < P < 0.1$）；其余因素对试验指标含杂率 Y_1 的影响不显著（$P > 0.1$）。x_1、x_1 的二次项对土壤覆盖度 Y_2 的影响极显著（$P < 0.01$）；x_2 的二次项对土壤覆盖度 Y_2 的影响显著（$0.01 < P < 0.05$）；其余因素对试验指标土壤覆盖度 Y_2 的影响不显著（$P > 0.1$）。将不显著的影响因素剔除，得到各因素对 Y_1、Y_2 的回归方程为

$$Y_1 = 5.29 + 0.34x_1 - 0.98x_2 + 0.36x_1x_3 - 0.46x_2x_3 - 0.41x_1^2 \tag{37}$$

$$Y_2 = 70.29 + 7.61x_1 - 8.69x_1^2 + 0.62x_2^2 \tag{38}$$

4.2.3　响应曲面分析

通过 Design-Expert 8.0.6 软件得出一级分离筛线速度 x_1、二级分离筛线速度 x_2 影响含杂率 Y_1 的响应曲面，如图 13 所示。

如图 13 所示，当二级分离筛线速度一定时，含杂率 Y_1 整体随着一级分离筛线速度的增加呈现逐

表 4 方差分析

Tab. 4 Variance analysis

变异来源	含杂率					土壤覆盖度				
	平方和	自由度	均方	F	P	平方和	自由度	均方	F	P
模型	6.31	9	0.70	10.71	0.000 1 ***	1 531.21	9	170.13	39.66	<0.000 1 ***
x_1	0.56	1	0.56	8.58	0.001 7 ***	1 062.93	1	1 062.93	247.75	<0.000 1 ***
x_2	3.65	1	3.65	55.78	<0.000 1 ***	3.96	1	3.96	0.92	0.354 4
x_3	0.01	1	0.01	0.20	0.664 3	4.57	1	4.57	1.06	0.321 1
x_1x_2	0.05	1	0.05	0.83	0.379 7	4.09	1	4.09	0.95	0.346 6
x_1x_3	0.40	1	0.40	6.12	0.027 9 **	2.29	1	2.29	0.53	0.478 0
x_2x_3	0.36	1	0.36	5.54	0.035 0 **	1.07	1	1.07	0.25	0.626 6
x_1^2	0.26	1	0.26	3.96	0.067 9 *	124.64	1	124.64	29.05	0.000 1 ***
x_2^2	0.07	1	0.07	1.00	0.335 5	19.16	1	19.16	4.47	0.044 5 **
x_3^2	0.02	1	0.02	0.29	0.599 0	5.61	1	5.61	1.31	0.273 5
残差	0.85	13	0.07			55.77	13	4.29		
失拟	0.79	5	0.16	20.79	0.000 2	7.77	5	1.55	0.26	0.923 5
误差	0.06	8	0.01			48.01	8	6.00		
总和	7.16	22				1 586.98	22			

注：* 表示影响较显著($0.05 < P < 0.1$)，** 表示影响显著($0.01 < P < 0.05$)，*** 表示影响极显著($P < 0.01$)。

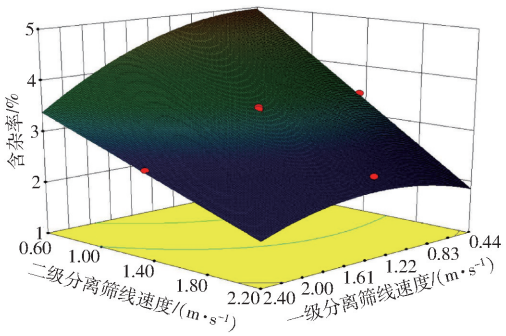


图 13 因素交互作用影响含杂率的响应曲面

Fig. 13 Response surface of impurity rate

渐减小的趋势，一级分离筛线速度较优范围为 1.42 ~ 2.40 m/s；当一级分离筛线速度一定时，含杂率 Y_1 整体上与二级分离筛线速度呈正相关，二级分离筛线速度较优范围为 1.4 ~ 2.2 m/s，其中一级分离筛线速度是影响含杂率的主要因素。确定一级分离筛线速度 1.42 m/s、二级分离筛线速度 2.2 m/s、侧输出线速度 1 m/s 为分离筛最佳工作参数，此工作参数下含杂率 2.56%，筛面土壤覆盖度为 69.11%。空载条件下，将土壤覆盖度近似当作田间作业时物料筛面覆盖分布情况。位姿变化和高速摄影拍摄效果如图 14、15 所示。

以机器前进方向为 x 轴负方向，由三轴姿态变化可得，在分离筛最优工作参数下，分离筛 y、z 轴方向的作业姿态受机器作业时的激励影响较大，而 x 轴向受到激励较小，x 轴向加速度幅值起伏变化较之 y、z 轴向变化可忽略不计，总体验证了主振动装置高频低幅的周期性运动规律，使筛面总体运转平稳，同时由高速摄影姿态追踪轨迹可见，土壤在筛面

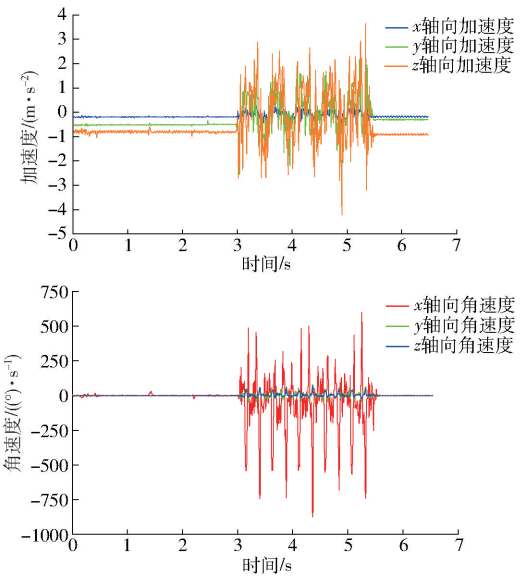


图 14 分离筛三轴姿态随时间的变化曲线

Fig. 14 Change of triaxial attitude of separation screen with time

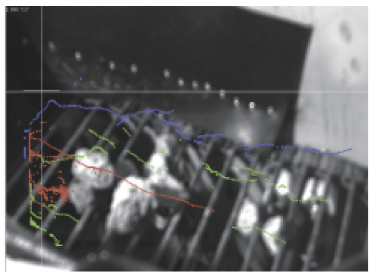


图 15 高速摄影姿态追踪效果

Fig. 15 Attitude tracking effect of high speed photography

的运动轨迹波动较小，呈现为微波浪形，且相邻土块之间干扰较小，土块在筛面上基本保持顺流姿态，顺流距离远远大于回流距离，符合理论分析结果。在

此工作参数下，筛面上的土壤之间的碰撞较少，可有效减低薯块与薯块、薯块与土壤之间的碰撞摩擦，减低破皮率、减少线性擦伤。因此空载试验确定的三级分离筛最佳速度组合参数可用于田间试验。

4.3　田间试验

4.3.1　试验方法

田间试验按照国家行业标准 NY/T 648—2015《马铃薯收获机质量评价技术规范》规定的试验方法，为测定该马铃薯收获机在黏重土壤条件下的收获性能，考虑影响其收获效果的主要因素[26]，由理论分析计算可知，分离筛振动强度和筛面倾角是影响分离破碎效果的主要因素，因此在空载试验确定分离筛最佳速度的条件下，为验证挖掘铲性能以及分离筛分离效果，采用正交试验方法，以工作速度 0.75 ~ 1.16 m/s、挖掘深度 120 ~ 200 mm、振动强度Ⅰ ~ Ⅴ级、筛面倾角 7° ~ 22° 为试验因素，设计四因素五水平正交试验，以明薯率、破皮率和伤薯率为试验指标。试验因素水平如表 5 所示，试验方案与试验结果如表 6 所示（z_1、z_2、z_3、z_4 为因素水平值）。

表 5　试验因素水平

Tab. 5　Test factors and levels

水平	因素			
	工作速度/（m·s^{-1}）	挖掘深度/mm	振动强度/级	筛面倾角/（°）
1	0.75	120	Ⅰ	7
2	0.83	140	Ⅱ	11
3	0.94	160	Ⅲ	15
4	1.05	180	Ⅳ	19
5	1.16	200	Ⅴ	22

4.3.2　试验结果分析

除上述 4 个因素外，设定其他因素保持不变，按照试验要求完成试验数据统计与分析，其试验效果如图 16 所示。

田间试验选用东方红-704 型轮式拖拉机，保持一级分离筛线速度为 1.42 m/s、二级分离筛线速度为 2.2 m/s、侧输出线速度为 1 m/s。

由表 6 可知，4 个因素对明薯率的影响由大到小为 z_4、z_3、z_1、z_2。若要求尽可能地提高明薯率，则应选择各因素所对应的 K_{1m}、K_{2m}、K_{3m}、K_{4m} 和 K_{5m} 中的最大值作为收获作业参数的最优水平，即：工作速度为 0.83 m/s、挖掘深度为 140 mm、振动强度为Ⅴ级、筛面倾角为 22°；4 个因素对破皮率的影响由大到小为 z_3、z_4、z_2、z_1，若要求尽可能地降低破皮率，则应选择各因素所对应的 K_{1p}、K_{2p}、K_{3p}、K_{4p} 和 K_{5p} 中的最小值作为收获作业参数的最优水平，即：工作速度为 1.16 m/s、挖掘深度为 120 mm、振动强度为Ⅲ级、筛

表 6　正交试验设计与结果

Tab. 6　Results of orthogonal test

试验号		因素				试验指标		
		z_1	z_2	z_3	z_4	明薯率/%	破皮率/%	伤薯率/%
1		1	1	1	1	96.6	0.87	0.69
2		1	2	2	2	96.7	0.98	0.85
3		1	3	3	3	97.3	1.26	0.94
4		1	4	4	4	98.1	1.69	1.78
5		1	5	5	5	98.6	6.97	1.95
6		2	1	2	3	97.5	1.64	1.01
7		2	2	3	4	99.1	1.73	1.49
8		2	3	4	5	98.6	1.86	1.53
9		2	4	5	1	97.4	1.78	1.34
10		2	5	1	2	96.1	1.62	1.08
11		3	1	3	5	98.6	1.32	1.26
12		3	2	4	1	97.6	1.67	1.59
13		3	3	5	2	97.3	2.32	1.76
14		3	4	1	3	96.1	1.82	1.54
15		3	5	2	4	97.1	1.79	1.68
16		4	1	4	2	95.9	1.35	1.05
17		4	2	5	3	97.0	1.29	1.37
18		4	3	1	4	98.1	1.35	0.99
19		4	4	2	5	99.1	1.41	1.32
20		4	5	3	1	97.4	1.31	1.29
21		5	1	5	4	98.7	1.67	1.27
22		5	2	1	5	97.8	1.73	1.31
23		5	3	2	1	96.6	1.29	1.21
24		5	4	3	2	95.8	0.96	0.95
25		5	5	4	3	97.2	0.87	0.64
明薯率	K_{1m}	487.3	487.3	484.7	485.6			
	K_{2m}	488.7	488.2	487	481.8			
	K_{3m}	486.7	487.9	488.2	485.1			
	K_{4m}	487.5	486.5	487.4	491.1			
	K_{5m}	486.1	486.4	489	492.7			
	R_m	2.6	1.8	4.3	10.9			
破皮率	K_{1p}	11.77	6.85	7.39	6.92			
	K_{2p}	8.63	7.4	7.11	7.23			
	K_{3p}	8.92	8.08	6.58	6.88			
	K_{4p}	6.71	7.66	7.44	8.23			
	K_{5p}	6.52	12.56	14.03	13.29			
	R_p	5.25	5.71	7.45	6.41			
伤薯率	K_{1s}	6.21	5.28	5.61	6.12			
	K_{2s}	6.45	6.61	6.07	5.69			
	K_{3s}	7.83	6.43	5.93	5.5			
	K_{4s}	6.02	6.93	6.59	7.21			
	K_{5s}	5.38	6.64	7.69	7.37			
	R_s	2.45	1.65	2.08	1.87			



（a）试验样机　（b）收获后效果　（c）无缓冲帘收获效果　（d）缓冲帘收获效果

图 16　田间收获试验

Fig. 16　Local effect of field harvest

面倾角为 15°;同理,4 个因素对伤薯率的影响由大到小为 z_1、z_3、z_4、z_2,收获作业参数的最优水平:工作速度为 1.16 m/s、挖掘深度为 120 mm、振动强度为Ⅰ级、筛面倾角为 15°。各试验因素在合理区间内的取值与其他因素共同影响着马铃薯的收获效果。实际作业过程中,在保证明薯率的同时,必须严格满足破皮率和伤薯率的标准要求。考虑云南省黏重板结土壤的具体条件,综合选取作业参数工作速度为 1.05 m/s、挖掘深度为 180 mm、振动强度为Ⅱ级、筛面倾角为 22°;作业结果为明薯 99.1%、破皮率 1.41%、伤薯率 1.32%,符合国家农业行业标准要求。

5 结论

(1)设计的基于多级分离筛振动抛撒、破碎分离多重减速缓冲机制和侧链输出铺放的多级分离缓冲马铃薯收获机,能一次完成挖掘、升运分离、清土除杂、薯秧分离、缓冲减损、低位集条集薯等作业。微波浪形薯土分离和振动碎土方式有效改善了对薯土混合物的抛撒、破碎和分离效果,提高了马铃薯收获机在黏重板结土壤下的作业效率。

(2)进行了空载试验,并借助高速摄影和三轴姿态传感器对分离筛上土块运动进行捕捉和分析,建立了影响因素与试验指标之间的回归模型。结果表明,当一级分离筛线速度为 1.42 m/s、二级分离筛线速度为 2.2 m/s、侧输出线速度为 1 m/s 时,相应的土壤覆盖度为 69.11%、含杂率为 2.56%。

(3)田间正交试验表明,提高明薯率的最佳工作参数为:工作速度为 0.83 m/s、挖掘深度为 140 mm、振动强度为Ⅴ级、筛面倾角为 22°;降低破皮率的最佳工作参数为:工作速度为 1.16 m/s、挖掘深度为 120 mm、振动强度为Ⅲ级、筛面倾角为 15°;降低伤薯率的最佳工作参数为:工作速度为 1.16 m/s、挖掘深度为 120 mm、振动强度为Ⅰ级、筛面倾角为 15°。考虑云南省黏重板结土壤的具体情况,综合选取工作速度为 1.05 m/s、挖掘深度为 180 mm、振动强度为Ⅱ级、筛面倾角为 22°,此时明薯率 99.1%、破皮率 1.41%、伤薯率 1.32%,各项性能指标均符合国家行业标准要求。

参 考 文 献

[1] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴 2018[M]. 北京:中国农业出版社,2018.

[2] 沈学善,刘小谭,王平,等. 西南地区马铃薯机械化种植现状、问题与建议[J]. 耕作与栽培, 2018(1):41 - 43.
SHEN Xueshan, LIU Xiaotan, WANG Ping, et al. Current situation problems and suggestions of potato planting mechanization in Southwest China[J]. Tillage and Cultivation, 2018(1):41 - 43. (in Chinese)

[3] 周玉华,刘汶树,张先锋,等. 西南地区马铃薯生产机械化与产业发展战略[J]. 农业开发与装备, 2017(10):6.

[4] 云南省统计局. 云南统计年鉴 2018[M]. 北京:中国统计出版社, 2018.

[5] 湛小梅,聂华林,李亚丽, 等. 宜机化整治地区油菜生产全程机械化作业体系研究[J]. 中国农机化学报,2019,40(7):197 - 203.
ZHAN Xiaomei, NIE Hualin, LI Yali, et al. Study on mechanized operation system of rapeseed production in suitable for remediation areas[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2019,40(7):197 - 203. (in Chinese)

[6] 柯剑鸿,周玉华,钟魏然, 等. 西南山区马铃薯机械化种植及收获技术研究[J]. 乡村科技,2016(17):7.

[7] 吕金庆, 于佳钰, 冯雪,等. 丘陵山地马铃薯挖掘机田间试验[C]//中国马铃薯大会,2019.

[8] AW K C, HUANG W D J, DE SILVA M W R P. Evaluation of climatic vibration testing on plastic waterproof enclosure for electronic equipment using ANSYS workbench[J]. Materials and Design,2006,28(9): 2505 - 2510.

[9] 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)

[10] 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/OL]. 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 potato stem separation equipment [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019, 50(6):100 - 109. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190611&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.011. (in Chinese)

[11] 谢胜仕,王春光,邓伟刚. 马铃薯相对分离筛运动位移分析与分离筛性能试验[J]. 中国农业科技导报,2019,21(8):71 - 81.
XIE Shengshi,WANG Chunguang, DENG Weigang. Displacement analysis of potato relative to separation sieve and separation sieve performance test[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2019,21(8):71 - 81. (in Chinese)

[12] 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/OL]. 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 harvester using double cushions for low laying separation technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(1):129 - 140, 112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190114&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.014. (in Chinese)

[13] ISSA I I M, ZHANG Zhaoguo, El-KOLALY W, et al. Design, ANSYS analysis and performance evaluation of potato digger

harvester[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2020, 29(1):60 - 73.

[14] 赵胜雪, 赵越, 刘权磊,等. 粘重土壤下马铃薯挖掘机分离输送装置优化与试验[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2020, 32(3):57 - 63.
ZHAO Shengxue, ZHAO Yue, LIU Quanlei, et al. Optimization and test of potato excavator's separating and conveying device in clay soil[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University,2020,32(3):57 - 63. (in Chinese)

[15] 冯朋博,王月宁,慕宇,等. 马铃薯块茎形成期增温对其淀粉含量、淀粉酶活性及产量的影响[J]. 西南农业学报,2019, 32(6):1253 - 1258.
FENG Pengbo,WANG Yuening,MU Yu, et al. Effect of high temperature on potato starch content, amylase activity and yield [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2019,32(6):1253 - 1258. (in Chinese)

[16] 吕金庆,衣淑娟,陶桂香, 等. 马铃薯播种机分体式滑刀开沟器参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(4):44 - 54.
LÜ Jinqing,YI Shujuan,TAO Guixiang, et al. Parameter optimization and experiment of splitter sliding-knife opener for potato planter[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(4):44 - 54. (in Chinese)

[17] 魏宏安,王蒂,连文香,等. 4UFD - 1400 型马铃薯联合收获机的研制[J]. 农业工程学报,2013,29(1):11 - 17.
WEI Hongan, WANG Di, LIAN Wenxiang, et al. Development of 4UFD - 1400 type potato combine harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1):11 - 17. (in Chinese)

[18] 杜小强,李党伟,贺磊盈,等. 基于电子果实技术的机械振动采收过程果实运动分析[J]. 农业工程学报,2017,33(17): 58 - 64.
DU Xiaoqiang,LI Dangwei,HE Leiying,et al. Fruit motion analysis in process of mechanical vibration harvesting based on electronic fruit technique[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(17):58 - 64. (in Chinese)

[19] 吕金庆,孙贺,兑瀚,等. 粘重土壤下马铃薯挖掘机分离输送装置改进设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11): 146 - 155.
LÜ Jinqing,SUN He,DUl Han,et al. Design and experiment on conveyor separation device of potato digger under heavy soil condition[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(11):146 - 155. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171118&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.018. (in Chinese)

[20] 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 potato kinetic characteristic during potato and soil separation on the swing separation screen [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University,2016. (in Chinese)

[21] 张德学. 新型马铃薯收获机的设计[D]. 泰安:山东农业大学,2014.
ZHANG Dexue. Design of a new type of potato harvester[D]. Taian: Shandong Agricultural University,2014. (in Chinese)

[22] 魏忠彩,李洪文,孙传祝,等. 振动与波浪二级分离马铃薯收获机改进[J]. 农业工程学报,2018,34(12):42 - 52.
WEI Zhongcai,LI Hongwen,SUN Chuanzhu,et al. Improvement of potato harvester with two segment of vibration and wave separation[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12):42 - 52. (in Chinese)

[23] RADY A M, SOLIMAN N. Evaluation of mechanical damage of lady rosetta potato tubers using different methods[J]. International Journal of Postharvest Technology and Innovation, 2015, 5(2):125.

[24] 谢胜仕, 王春光, 蒙建国,等. 摆动分离筛上马铃薯运动速度分析与试验[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(8):100 - 107.
XIE Shengshi,WANG Chunguang,MENG Jianguo, et al. Velocity analysis and experiment of potato on swing separation sieve [J]. Journal of China Agricultural University,2017, 22(8):100 - 107. (in Chinese)

[25] 顾祝军. 植被覆盖度的照相法测算及其与植被指数关系研究[D]. 南京:南京师范大学,2005.
GU Zhujun. Study on photographic measurement of vegetation coverage and its relationship with vegetation index [D]. Nanjing: Nanjing Normal University,2005. (in Chinese)

[26] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(1):103 - 113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200111&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.011. (in Chinese)