

基于多段分离工艺的马铃薯联合收获机设计与试验

魏忠彩¹ 李洪文¹ 孙传祝^{2,3} 李学强^{2,4} 苏国梁^{2,5} 刘文政¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 山东省马铃薯生产装备智能化工程技术研究中心, 德州 253600;

3. 山东理工大学机械工程学院, 淄博 255091; 4. 山东希成农业机械科技有限公司, 德州 253600;

5. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255091)

摘要: 针对马铃薯分段收获人工捡拾工作量大、劳动强度高、收获效率低等问题, 在适应种植模式和农艺要求的基础上, 设计了一种基于多段分离工艺的马铃薯联合收获机, 该机可同时完成双垄双行马铃薯的挖掘、薯土分离、清土除杂和集薯输送等任务。收获机在拖拉机的牵引作用下进行收获作业, 其关键零部件包括松土限深调控装置、切土切蔓装置、挖掘装置、摆抖式薯土分离装置、过渡分离装置、清土除杂装置和集薯输送装置等。该收获机采用多段分离工艺, 可有效提高薯土分离效率, 显著降低含杂率, 降低劳动强度。田间试验表明: 作业速度分别为 3.17 km/h 和 4.16 km/h 时, 样机的损失率分别为 1.64% 和 1.59%, 伤薯率分别为 1.72% 和 1.48%, 破皮率分别为 2.31% 和 1.92%, 生产率分别为 0.41 hm²/h 和 0.54 hm²/h, 各项性能指标均达到了作业标准。基于碰撞检测技术获取了收获过程中薯块的动态碰撞信息, 在对碰撞特征和薯土混合物运动特点进行分析的基础上, 明确了联合收获机易产生较大碰撞加速度的关键位置为: 分离筛 I 与分离筛 II 交接处及集薯输送装置的落料端, 降低分离筛 I 和分离筛 II 之间的高度差, 改善集薯装置末端的缓冲效果, 是降低伤薯率和破皮率的有效措施。

关键词: 马铃薯; 联合收获机; 多段分离; 碰撞检测

中图分类号: S225.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)01-0129-12

Design and Experiment of Potato Combined Harvester Based on Multi-stage Separation Technology

WEI Zhongcai¹ LI Hongwen¹ SUN Chuazhu^{2,3} LI Xueqiang^{2,4} SU Guoliang^{2,5} LIU Wenzheng¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

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

3. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255091, China

4. Shandong Xicheng Agricultural Machinery Science and Technology Co., Ltd., Dezhou 253600, China

5. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255091, China)

Abstract: The main technical problem of potato mechanical partition harvest is the large workload for farmers to pick up, high labor intensity and low harvest efficiency. A potato combined harvester based on multi-stage separation technology was developed on the basis of planting patterns and agronomic requirements. It could implement digging, potato-soil separation, soil cleaning and potato gathering simultaneously under the condition of double ridge and double row. The harvester was worked by the tractor's traction, the key parts of the harvester included depth control device of loosing soil, device of cutting soil and seedings, device of digging, shaking device of potato-soil separation, device of transition separation, device of removing soil and impurities and collecting device. The harvester adopted multi-stage separation technology, which could effectively improve the separation efficiency of potato-soil, reduce impurity content and labor intensity significantly. Field tests showed that loss rates were 1.64% and 1.59%, damage rates were 1.72% and 1.48%, and bruising rates were 2.31% and 1.92% and the productivity were 0.41 hm²/h and 0.54 hm²/h when the harvesting speeds were 3.17 km/h and

收稿日期: 2018-07-23 修回日期: 2018-09-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701603-02)、山东省泰山产业领军人才工程高效生态农业创新类项目(LJNY201615)、山东省重大科技创新工程项目(2017CXGC0219)和山东省农机化装备研发创新项目(2016YF034)

作者简介: 魏忠彩(1990—),男,博士生,主要从事现代农业装备与计算机测控技术研究, E-mail: weizc2011sdut@163.com

通信作者: 李洪文(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备与计算机测控技术研究, E-mail: lhwen@cau.edu.cn

4.16 km/h, respectively. All the performance indexes met the requirements of NY/T 648—2015 Technical Specification for Quality Evaluation of Potato Harvester. In addition, the dynamic impact information of potatoes was obtained during harvesting based on the impact detection technology. It was confirmed that the key position of the combined harvester to produce greater impact force was the junction of separation sieve I and separation sieve II and the end of collecting device. Reducing the height difference between separation sieve I and separation sieve II and improving the buffering effect at the end of collecting device were effective measures to reduce damage rate and bruising rate. It could provide a technical reference for further exploring the technology of potato-soil separation and the research of potato combined harvester.

Key words: potato; combined harvester; multi-stage separation; impact detection

0 引言

机械化收获是实现马铃薯生产全程机械化的关键环节^[1-2]。目前国内马铃薯收获以分段收获为主,但仍需大量人力进行捡拾,花费较高,农民劳动量较大,且效率低^[3]。我国北方地区秋季降温较快,马铃薯一般需抢收入库,而分段收获效率较低,易导致未及时收获入库的马铃薯冻伤。因此,需要收获效率高、伤薯率低,并且方便实用的马铃薯联合收获装备。在保证马铃薯收获品质的前提下,尽可能高效去除秧蔓、泥土及石块等杂质,是实现马铃薯高效低损收获机械化的关键^[4-5]。

在收获环节,薯块碰撞冲击与接触摩擦,加之薯块自身形状不规则、尺寸分布不均匀等因素,易产生薯块切线擦伤及内部损伤^[6]。薯土分离形式是影响分离效率和收获品质的关键因素,目前收获机基本上都是采用“斜置平输送+振动分离”^[7]、拨辊推送式结构^[8]、拨指轮式结构^[9]以及立式环形分离^[10]、摆动分离^[11]和振动与波浪二级分离^[12]等形式,也有马铃薯收获与残膜回收联合作业形式^[13-14]。对于联合收获机来说,薯块输出一般采用侧臂输出式^[15]和分级装袋^[16-17]等形式。作业过程中,不同土壤类型对分离形式和输送方式的需求不一,其分离效率和收获品质易受多方面的因素影响^[18-20]。此外,还存在破皮损伤机理不明确、作业参数匹配不够合理以及分离效率与破皮率矛盾突出等问题^[11]。

利用碰撞检测传感器采集机械化收获过程中农产品的碰撞冲击是评估潜在损伤的一种先进技术,一般通过三维加速度传感器和压力传感器获取被测对象动载和静载作用下的力学特性^[21-23]。试验时,碰撞检测传感器混合于收获机的“物料流”中,可经历与“物料流”相同的运动特征,碰撞信息被记录和存储于碰撞检测系统中,以便于在后期分析的基础上改进与调整机具^[24]。

薯块在收获过程中的运动特征复杂多变,探索收获环节的碰撞特征对收获品质的影响规律,有助

于指导不同收获工况下的机具参数调整,更好地服务生产实际。目前,关于薯土分离过程中碰撞特征方面的研究较少,本文在借鉴国外马铃薯联合收获先进技术的基础上,设计一种基于多段分离工艺的马铃薯联合收获机,根据各阶段的薯土分离特点进行机具的总体设计及关键部件的设计,以期提高作业效率和收获品质,降低捡拾工作量和劳动强度。

1 总体设计与工作原理

1.1 总体结构与工作原理

针对马铃薯主产区机械化收获水平较低等问题,结合国内较为普遍的马铃薯垄作种植模式和农艺要求,研制的基于多段分离工艺的双垄双行马铃薯联合收获机如图1所示。该收获机直接与拖拉机的后牵引架相连,其主要包括传动装置、松土限深调控装置、切土切蔓装置、挖掘装置、摆抖式薯土分离装置、过渡分离装置、清土除杂装置、集薯分离装置、薯秧分离装置和集薯输送装置。收获机可实现挖掘

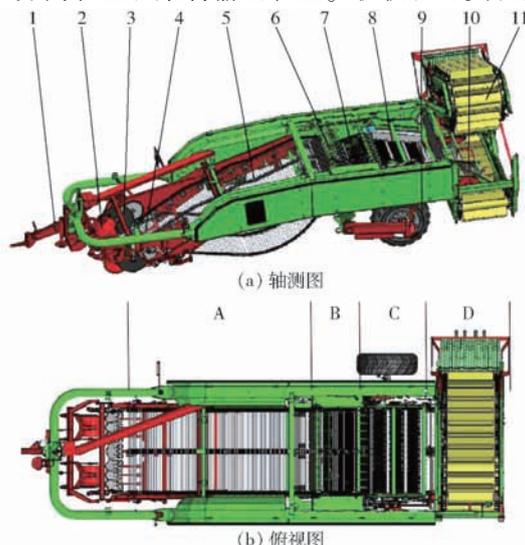


图1 基于多段分离工艺的双垄双行马铃薯联合收获机结构图

Fig. 1 Structure of double row potato combined harvester based on multi-stage separation technology

1. 牵引装置 2. 松土限深调控装置 3. 切土切蔓装置 4. 挖掘装置 5. 分离筛 I 6. 薯秧分离装置 7. 分离筛 II 8. 清土除杂装置 9. 地轮 10. 分离筛 III 11. 集薯输送装置

深度自动调整,能够适应坡地作业;由于采用多段分离工艺,薯土分离及清杂装置配合使用,且“薯-土-杂”有效分离距离较长;为避免机器自身过重而压溃薯垄,导致薯块之间相互挤压擦伤薯,设置了松土限深调控装置,既可松离薯土、又能减轻后续的薯土分离负担。

马铃薯收获机的全程输送分离工作划分为 4 个阶段,A 阶段为分离筛 I,由偏心轮机构实现“摆动”和“抖动”动作,从而完成“摆抖”分离;B 阶段为水平布置的分离筛 II;C 阶段为由清杂辊和光辊间隔布置的清土除杂装置;D 阶段由水平布置的分离筛 III 和集薯输送装置组成。

其具体的工作原理为:田间作业时,收获机在拖拉机的牵引下向前运行,两组松土限深调控装置起到松离薯土作用,并与挖掘装置协调控制挖掘深度,挖掘铲铲起大量的薯土混合物。切土切蔓装置的切土盘切开薯垄两侧土壤,待分离的薯土混合物经挖掘装置挖掘并输运至摆抖式薯土分离装置,部分土块在摆抖式薯土分离装置的“摆动”和“抖动”作用下破碎,小于相邻杆条间隙的土壤和杂质穿过分离筛 I 落下;在 A 阶段未完成分离的薯土混合物依次进入过渡分离装置的分离筛 II、清土除杂装置和集薯分离装置的分离筛 III,在较长的薯土分离行程内,土块在反复碰撞、摩擦、翻滚以及外界激振力的振动作用下完成破碎与分离,绝大部分秧蔓及杂草等易缠绕物在两级薯秧分离装置作用下分离。最终分离干净的薯块由可伸缩调整的集薯装置输运至料斗车。

1.2 动力传递方式

分离阶段机械部分的动力传递路线如图 2 所示。收获机的动力输入轴与拖拉机后输出轴相连接,且经变速箱变速后将动力传递给摆抖式薯土分离装置的驱动滚筒 I,在驱动分离筛 I 运行的同时,采用 V 形带驱动滚筒 II 运转,并驱动分离筛 II 运行;驱动滚筒 II 一方面经链传动驱动清土除杂装置的主动辊运转,并驱动清土除杂装置的清杂辊和光辊的运转,清杂辊旋转方向与薯土混合物输送方向一致,光辊旋转方向与清杂辊旋转方向相反。另一方面还经链传动驱动集薯输送分离阶段的分离筛 III 运行。同时,分别位于分离筛 I 和分离筛 II 后的薯秧分离装置的抽秧轴 I 和抽秧轴 II 转向分别与两分离筛运行方向相反。

另外,液压系统的动力传递路线为:拖拉机液压系统与松土限深调控装置的松土限深轮上方的进油口相连,使得松土限深轮在“浮动”状态下与挖掘装置协调配合,实现“限深”与“减压”;拖拉机液压系

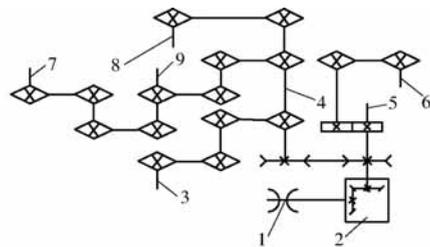


图 2 分离阶段动力传递路线

Fig. 2 Power transmission route in separation stage

1. 动力输入轴 2. 变速箱 3. 抽秧轴 I 4. 驱动滚筒 II 5. 驱动滚筒 I 6. 抽秧轴 II 7. 光辊 8. 分离筛 III 驱动轴 9. 清杂辊

统与摆动式薯土分离装置的液压马达的进油口相连,使得液压马达驱动偏心轮回转,实现胶轮交替抖动击打分离筛 I;拖拉机液压系统与集薯输送装置的伸缩调整装置的液压缸进油口相连,实现自由伸缩控制。

1.3 主要技术参数及结构特点

基于多段分离工艺的双垄双行马铃薯联合收获机的主要技术参数如表 1 所示。同时,由于不同阶段薯土混合物的薯土比例各不相同,故本设计采用多种结构的薯土分离工艺配合使用。如:在收获机前段采用“摆抖”式薯土分离工艺,有利于薯土混合物分离量较大工况下的碎土与分离,且摆抖频率和幅度可调,提高了马铃薯收获机的适应性。在“摆抖”薯土分离阶段后采用过渡输送分离工艺,“薯-土-杂”混合物由斜置的分离筛 I 进入平置的分离筛 II,并且在分离筛 II 的前后均设有薯秧分离装置,薯秧分离装置利用分离筛驱动滚筒和抽秧轴的转动作用实现薯秧分离^[17],该阶段主要作用是完成残留

表 1 马铃薯联合收获机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of potato combined harvester

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	8 848 × 2 737 × 3 562
整机质量/kg	5 562
配套动力/kW	90 ~ 120
收获垄数	2
作业幅宽/mm	1 650
适应垄宽/mm	≤ 700
挖掘深度/mm	150 ~ 300
纯工作时间生产率/($\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.32 ~ 0.55
分离筛 I 两相邻杆条中心距/mm	45
分离筛 II 两相邻杆条中心距/mm	40
分离筛 III 两相邻杆条中心距/mm	30
分离筛 I 有效分离长度/mm	3 850
分离筛 II 有效分离长度/mm	890
清土除杂装置总长度/mm	1 084
分离筛 III 有效分离长度/mm	942
集薯输送装置总长度/mm	9 900

秧蔓及杂草的分离,实现有效过渡分离。经过渡分离后的马铃薯表面往往粘着一层泥土,薯块之间还掺杂一些薯秧、杂草等,因此采用清土除杂分离工艺,该阶段主要通过清杂辊和光辊的转动和摩擦揉搓作用来实现清土除杂。

通过前期收获试验及碰撞检测分析可知^[12,25],当薯块的跌落高度大于其临界损伤高度时,薯块将产生机械损伤和切线擦伤,同时产生塑性变形现象;反之则不会造成伤薯破皮现象。薯块从挖掘到装车经过4个阶段的分离,如果分离工艺或结构参数优化不当,则难以获得理想的伤薯率及含杂率等。为减小过渡分离环节的碰撞加速度峰值,分离筛Ⅱ的杆条采用包裹弹性材料的方式实现减损控制。在马铃薯运动至集薯装置前,采用集薯输送分离工艺,以实现集薯输送分离装置的再次分离,为了减少薯块回流概率和碰撞次数,在分离筛Ⅲ上方间隔布置了防回流橡胶指。另外,分离筛Ⅲ采用“纵向非等距”布置,有利于薯块跌落后均匀分布于集薯输送装置的柔性输送带上,有利于减少碰撞次数。跌落高度小于100 mm时,薯-薯碰撞减损控制效果明显^[25],分离过程中薯块在B阶段和C阶段接触到的分离部件为弹性橡胶材料,薯块在D阶段自分离筛Ⅲ落入集薯输送装置设有柔性缓冲挡帘,同时柔性输送带也具有缓冲减损的作用;另外,B阶段和C阶段未分离的土壤对薯块具有一定保护作用。综合考虑多方面的减损控制效果,取分离筛Ⅰ和分离筛Ⅱ的驱动滚筒直径均为194 mm,为了尽可能减小跌落高度,对应的薯秧分离装置抽秧轴注胶层直径分别取77.5 mm和69 mm。

2 关键部件设计

2.1 挖掘部件设计及参数选择

挖掘装置主要用于疏松薯垄和掘起薯土混合物,为后续薯土分离运输物料创造良好条件。铲刃斜角 γ 指铲刃与收获机前进方向的夹角, γ 是影响挖掘铲铲刃能否自动清洁和保持良好挖掘性能的重要参数之一,同时也决定着挖掘铲结构^[26]。铲刃斜角 γ 的选择应满足^[27]

$$\gamma < 90^\circ - \varphi \quad (1)$$

式中 φ ——土壤对铲面的摩擦角, ($^\circ$)

减小铲刃斜角 γ 可提高挖掘装置的入土切削性能,但若铲刃斜角 γ 过小,则会增加铲面长度,这不利于挖掘深度控制及挖掘作业的减阻。土壤对钢材的摩擦因数 $\tan\varphi$ 为0.4~0.7,所以 γ 为 $55.1^\circ \sim 68.2^\circ$ ^[27]。在挖掘装置的入土部件设计中,将对应于垄沟位置作业的中间挖掘铲设计成“对称式”(如

图3所示),并取较大值 $\gamma_z = 70^\circ$,其铲面宽度也相对较大,这是由于中间铲铲面对应于垄沟位置,单位面积内挖掘物料相对较少,挖掘阻力也较小。将对应于薯垄位置作业的两侧挖掘铲组设计成由3片铲片组成(如图3所示),采用“偏置式”结构,且位于薯垄两侧的挖掘铲铲片对称布置,铲刃斜角相等,取值为 $\gamma_{c1} = \gamma_{c2} = 57^\circ$,中间铲片 $\gamma_{cz} = 61^\circ$ 。整体而言,单个挖掘铲组的3片挖掘铲呈“对称”结构布置,保证了单个挖掘铲组整体侧刃形成的夹角为 $\gamma_{r1} = \gamma_{r2} = 114^\circ$,有利于减阻和切削。

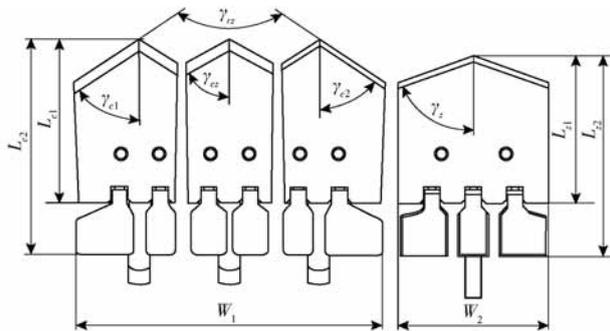


图3 挖掘装置关键部件设计参数

Fig.3 Design parameters of key parts of excavator

为保证挖掘装置挖掘起整个薯垄,对应于薯垄位置作业的两侧挖掘铲的有效工作宽度 W_1 应略大于垄底宽度,计算式为^[28-29]

$$W_1 = L + s + 3\sigma + \varepsilon \quad (2)$$

式中 L ——马铃薯种植行距,mm

s ——马铃薯生长平均分布宽度,mm

σ ——综合标准差,mm

ε ——机具行驶偏差,mm

经分析计算,取单个侧挖掘铲组有效工作宽度 $W_1 = 556$ mm。结合马铃薯种植农艺,取中间挖掘铲有效工作宽度 $W_2 = 279$ mm。为保证自动清洁和碎土性能,单个侧挖掘铲组的铲片均设有2个铲翼,中间挖掘铲设有3个铲翼。单个侧挖掘铲组铲片长度 $L_{c1} = 305$ mm,加上铲翼后的总长度 $L_{c2} = 401$ mm;中间挖掘铲铲片长度 $L_{c1} = 275$ mm,加上铲翼后的总长度 $L_{c2} = 371$ mm。联合收获作业之前,一般都配套一阶段式收获机,首先每间隔两垄进行收获,并将收获后的马铃薯铺放于尚未收获的马铃薯两垄之间的垄沟内。中间挖掘铲主要用于收集铺放于垄沟内的薯块,故其总长度 L_{c2} 小于侧挖掘铲。

马铃薯在薯垄中的生长深度一般小于220 mm,因此挖掘深度要大于匍匐式生长的马铃薯在薯垄中的最大深度,以避免铲及薯块。确保薯土混合物沿着挖掘铲上表面向后运动的条件是

$$P \geq G_c \tan(\alpha + \varphi) \quad (3)$$

式中 P ——挖掘铲铲面掘起土壤的作用力(挖掘

阻力), N

G_c ——挖掘铲铲面上薯土混合物的重力, N

α ——挖掘铲入土角, ($^\circ$)

可以看出,挖掘阻力 P 随着入土角 α 的增加而加大,但是在考虑节能降耗、尽量减小挖掘铲入土角 α 的同时,必须综合考虑挖掘铲的入土性能和碎土特性^[30]。此外,土壤类型的不同也影响着薯土混合物与挖掘铲铲面的摩擦角 φ 。研究表明,马铃薯垄作收获的挖掘铲入土角 α 一般设置为 $20^\circ \sim 30^\circ$ 。从不同的种植农艺及土壤类型考虑,可通过调整挖掘装置角度调整杆的高低位置来实现不同的入土角 α 的调整。另外,针对坡地作业条件下易导致两侧挖掘深度不一致,易导致不必要的损失,且影响整机的自平衡的问题,采用“可调机架回转”思路,使得收获机前段的挖掘装置可实现整体自动调整,其调整原理如图 4 所示。

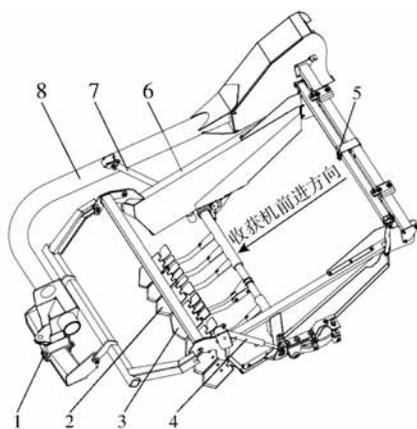


图 4 挖掘深度调整原理图

Fig. 4 Schematic of adjustment of digging depth

1. 前回转轴 2. 侧挖掘铲组 3. 中间挖掘铲 4. 液压缸 I
5. 后回转轴 6. 可调机架 7. 液压缸 II 8. 收获机架

可调机架依靠前、后回转轴与收获机架铰接,可调机架可绕前、后回转轴整体回转,故松土限深调控装置、切土切蔓装置及挖掘装置均可实现同步调整。在坡地收获作业时,可通过两侧液压缸来控制可调机架与收获机架的相对位置关系,当收获薯垄一侧较高时,则对应该侧薯垄的可调机架“向上提升”,另一侧则“向下降低”,以确保作业过程中可调机架的倾斜角度与收获地表一致,实现挖掘深度与坡地相适应,整机平衡性好,既保证收获品质,又利于减阻降耗。

2.2 松土限深调控装置设计及参数选择

马铃薯收获前,由于长时间未耕作,薯垄土壤未被扰动,直接收获时易结块,影响后续的薯土分离效率和收获品质。现有收获机一般采用松土限深轮来压碎土块,但控制不当易伤薯^[5]。该收获机自身质量达 5 562 kg,加之所收获物料的质量,采用现有松

土限深方式无法控制收获作业时的土块压碎程度,故难以保证收获效率和伤薯率。基于液压控制技术设计的单组松土限深调控装置如图 5 所示。

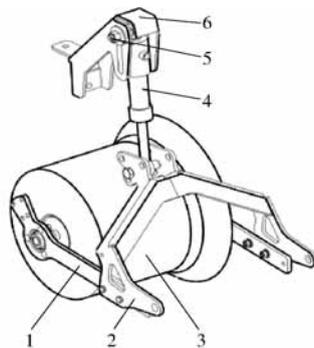


图 5 松土限深调控装置结构简图

Fig. 5 Structure diagram of control device of loosening soil

1. 摆臂 2. 支架 3. 松土限深轮 4. 液压缸 5. 销轴 6. 吊架

当遇到薯垄凹凸不平、土壤密实程度不断变化,松土限深轮受到的土壤反作用力有所差异时,松土限深轮通过摆臂和支架的上下摆动,带动液压缸活塞杆在缸体内伸缩,使得松土限深轮与土壤之间的作用力基本保持不变,即处于一种“浮动”状态下工作,从而既达到薯土松离的效果,又可避免压溃薯垄而导致伤薯等不必要的损失。结合马铃薯种植常见的垄型参数,松土限深轮设计成直径 405 mm,总宽度为 385 mm,一侧呈与垄型相适应的“锥台”状,且“锥台”高度为 95 mm。松土限深调控装置一般与挖掘装置配合工作,通过调整液压缸缸体在吊架长槽内的不同位置,即可改变机具施加在松土限深轮的压力设定值。具体调整时,可通过改变销轴在支架斜上方不同孔中的安装位置来实现。本文设计的松土限深调控装置可保证挖掘深度均匀一致,既节能降耗,又能减轻后续环节的薯土分离负担。松土限深调控装置两液压缸的缸径 D_1 、 D_2 计算式为

$$D_1 = D_2 = \sqrt{\frac{2F_{\max}}{\pi P_f} + d^2} \quad (4)$$

式中 F_{\max} ——单垄最大作用负载, N

P_f ——液压缸活塞杆的工作压力, N

d ——活塞杆外径, m

经计算,本机具选用缸径 $D_1 = D_2 = 40$ mm、活塞杆外径为 25 mm、行程为 500 mm,且使用压力小于等于 16 MPa 的液压缸。

2.3 摆抖机构设计与分析

2.3.1 摆抖薯土分离装置设计

为改善薯土分离效果,与阶段收获相比,分离筛 I 的长度及质量显著增大,若采用常见的胶轮回转抖抖形式^[1,12],则振动效果不够理想。设计的基于偏心轮机构的振动调整装置,其分离筛 I 采用杆条

式结构,如图6所示。

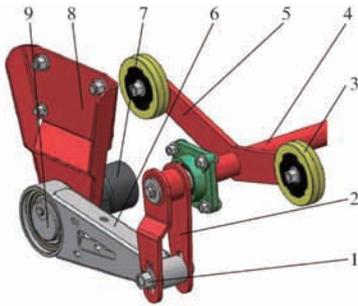


图6 基于偏心轮机构的振动调整装置

Fig. 6 Vibration adjusting device based on eccentric wheel mechanism

1. 连接轴 2. 摇臂 3. 胶轮 4. 摆动轴 5. 胶轮架 6. 连杆
7. 液压马达 8. 固定板 9. 偏心轮

收获作业时,液压马达驱动偏心轮运转,并通过连杆带动摇臂绕着摆动轴往复摆动,进而带动固定在摆动轴上的胶轮架也绕着摆动轴往复摆动,从而使得安装在胶轮架上的6个胶轮做以摆动轴中心 O_1 为圆心、以胶轮中心 E_2 或 E_3 到 O_1 点的距离为半径的“弧线”形往复摆动(如图7所示),交替击打分离筛I杆条。胶轮击打杆条产生的激振力周期性地向上方承托的薯土混合物施加振动作用,将其前后运行的分离筛I前段和后段交替顶起、落下,使得分离筛上的薯土混合物持续受到“前波浪-直线-后波浪”交替变化的上下波动作用,在实现碎土、薯土分离的同时,薯块也不会因产生剧烈“跳跃”和“回弹”等现象而产生损伤。

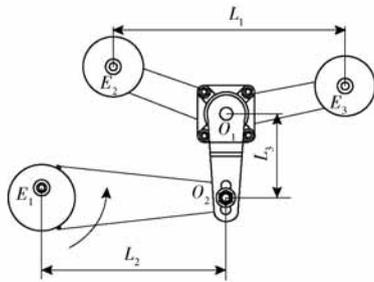


图7 薯土分离装置摆抖机构参数

Fig. 7 Parameters of shaking mechanism in isolation device of tuber soil

当遇到不同收获工况时,通过调整液压马达的供油压力即可调整施加于分离筛I上的振动频率;通过改变销轴在摇臂直臂和曲臂的不同圆孔的铰接位置,即可实现振幅的调节。经计算分析,设计的偏心轮外径为80 mm,偏心轮圆心到偏心轮回转中心 E_1 的距离为21 mm,两抖动胶轮的中心线距离 L_1 为485 mm,偏心轮回转中心 E_1 到摆臂与连杆连接点 O_2 的距离 L_2 为383 mm,回转轴中心 O_1 到摆臂与连杆连接点 O_2 的距离 L_3 可以在150、175、200 mm之间选择,以实现不同振动幅度的调整。

2.3.2 摆抖分离运动特征分析

由“摆抖”薯土分离工艺和“多段分离”工艺结构特点可以看出,薯土分离装置摆抖机构的抖动强度(振幅、频率)对整个环节的分离效率和收获品质均有重要的影响。图8是摆抖机构前段顶起、落下、后段顶起、落下状态示意图。

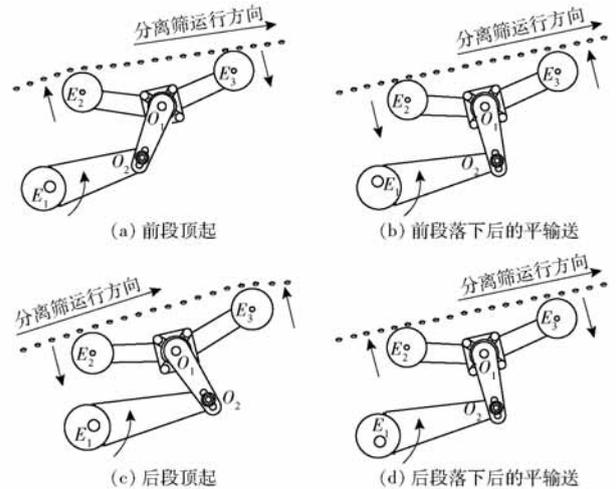


图8 振动调整示意图

Fig. 8 Schematics of vibration adjustment

薯土分离装置摆抖机构用于周期性地改变分离筛I杆条的运动轨迹,从而影响薯土混合物的运动轨迹。图8a为分离筛I在前段顶起状态时的运动特征示意图,此时偏心轮通过连杆带动摇臂绕着 O_1 顺时针摆动,即连杆往前移动,从而使得 E_2 点绕着 O_1 向上翘起,分离筛I的前段被顶起, E_3 点绕着 O_1 向下运动,故分离筛I在前胶轮的支撑作用下形成波浪形,且波峰位于 E_2 点正上方,即分离筛I呈前升后降趋势运行。图8b为分离筛I在自由状态时的运动特征示意图,此时偏心轮通过连杆带动摇臂绕着 O_1 逆时针摆动,即连杆往后移动使得摇臂后摆至铅垂状态, E_2 点绕着 O_1 向下运动, E_3 点绕着 O_1 向上微抬而构成分离筛I的平输送分离状态。图8c为分离筛I在后段顶起状态时的运动特征示意图,此时摇臂继续绕着 O_1 逆时针摆动至后倾状态,从而使得 E_3 点绕着 O_1 向上翘起, E_2 点绕着 O_1 向下运动,故分离筛I在后胶轮的支撑作用下形成波浪形,且波峰位于 E_3 点正上方,即分离筛I同样呈前升后降趋势运行。图8d为分离筛I在另一自由状态时的运动特征示意图,即前低后高的平输送分离状态,运动特征与图8b类似,不再赘述。

2.4 清土除杂装置设计及参数选择

考虑到在粘重土壤条件下收获时,经分离筛I的“摆抖”分离和过渡分离后的薯块表面仍粘有一层泥土,其中还掺杂一些薯秧、杂草等,因此仅仅依靠传统的杆条式薯土分离形式,无法很好地去除薯

块表面的泥土,清土除杂效果欠佳。鉴于上述问题,利用清杂辊和光辊交错布置的方式设计了一种清土除杂装置,其结构主要由清杂辊、光辊、调节板、支撑臂和支座等组成(如图 9 所示)。清土除杂装置整体布置在过渡分离装置的分离筛Ⅱ与集薯分离装置的分离筛Ⅲ之间,共设有 6 个清杂辊和 3 个光辊。

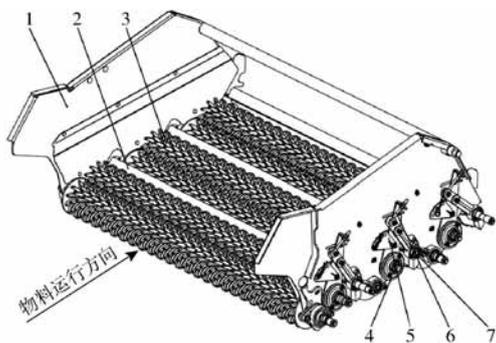


图 9 清土除杂装置结构简图

Fig. 9 Structure diagram of removing device of soil and impurities

1. 立板 2. 光辊 3. 清杂辊 4. 支撑臂 5. 调节板 6. 调整杆 7. 支座

由于分离筛Ⅰ的有效分离行程较长,本文采用“摆抖”分离方式所产生的波浪形作用来实现碎土分离;未分离的土块则在清土除杂装置的转动作用下进一步实现分离,即通过“摆抖”分离与清土除杂装置相结合的形式来确保较好的碎土分离效果。收获作业时,由链传动提供的动力驱动清杂辊和光辊转动,通过调整杆可以调整两相邻清杂辊之间的前后距离以及清杂辊和光辊之间的距离,以满足清土除杂分离作业的实际需求。清杂辊上装有清杂轮,为增加清杂轮与马铃薯表面之间的接触摩擦次数,以发挥更好的清土效果,设计的清杂轮外圆布置有 12 个橡胶指。经计算与校核,设计的清杂轴横截面呈“两端圆、中部方”的结构特点,清杂轴中部的尺寸为 $32\text{ mm} \times 32\text{ mm}$,综合考虑安装和更换方便,将清杂轮方孔尺寸调整为 $32.5\text{ mm} \times 32.5\text{ mm}$,光辊的轴径为 48 mm 。清杂辊与光辊呈前高后低的形式布置,清杂辊上母线的线速度方向与由分离筛Ⅱ输送过来的混合物的运行方向相同,光辊的旋转方向则与清杂辊相反,且光辊的转速小于清杂辊转速。马铃薯在清杂辊的驱动作用下继续向前运行,其运行速度略小于清杂辊橡胶指端部最高点的线速度。由于光辊的阻碍作用,使得马铃薯的运行速度降低,与清杂辊的最高点线速度之间形成一个速度差,从而实现清杂辊对马铃薯表面摩擦和揉搓,以清除其表面泥土。另外,针对粘重土壤作业工况,清杂辊施加于马铃薯表面的摩擦和揉搓作用,有利于清除包裹在马铃薯表面的泥土,即有助于提高粘重土壤条件

下的薯土分离效果,以尽可能降低含杂率;利用相邻清杂轮之间的缝隙以及清杂辊和光辊的转动完成泥土及秧蔓的分离,即清杂辊利用该速度差抽取混合物中的秧蔓及杂草等,完成秧蔓的清理工作。对于大于清杂辊与光辊之间缝隙的土块,将其压碎至小于缝隙后直接从缝隙中落下。

2.5 集薯分离装置设计与分析

传统的分离筛运输薯块至输送带时,薯块跌落至输送带后的“薯群”易呈现“堆积”现象,较大的料层厚度容易使得薯块在运输过程中相互挤压碰撞,输送带柔性缓冲减损作用也得不到充分利用,从而易导致破皮和伤薯等。为充分利用输送带在宽度方向上的有效输送空间,在摆抖分离、过渡分离、薯秧分离和清土除杂后,将马铃薯均匀地分布于柔性输送带上,本文采用纵向非等距形式设计了一种集薯分离装置(如图 10 所示),其结构主要由主动辊、从动辊Ⅰ、从动辊Ⅱ、分离筛、缓冲装置和刮土装置等组成。

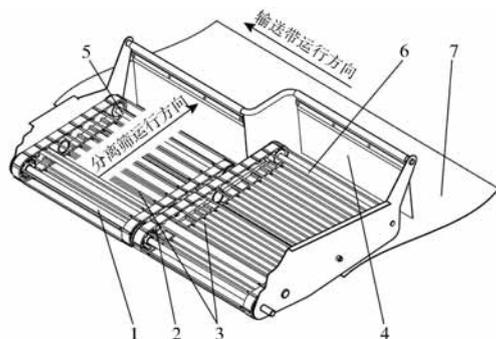


图 10 集薯分离装置结构简图

Fig. 10 Structure diagram of collecting device

1. 主动辊 2. 刮土刀 3. 杆条 4. 挡帘 5. 从动辊Ⅰ 6. 从动辊Ⅱ 7. 输送带

柔性挡帘的缓冲可有效减小薯块的水平方向运行速度,减轻薯块由于跌落碰撞时动能较大而导致的伤薯现象。安装于主动辊后方的防缠刀可刮去主动轮表面上附着的泥土,并切断缠绕在主动轮拨齿上的秧草,避免因土壤和秧蔓在主动轮上堆积和聚集而影响输送分离效率。另外,由于分离筛Ⅲ两侧的有效输送分离行程不相等,经分离筛Ⅲ输送分离后的马铃薯将分别平铺至输送带宽度方向的不同位置,可进一步减轻薯块由于跌落碰撞次数较多而导致的伤薯现象,还可有效避免料层过厚而导致薯块的碰撞擦伤甚至过度挤压损伤,从而确保马铃薯的收获品质。

3 样机试验

3.1 种植农艺及试验地概况

马铃薯常见的垄作种植形式有单垄单行和单垄双行 2 种(如图 11 所示),播种后薯种位于垄的底

部,由播种机覆土后形成的垄顶宽度和垄高一般为100~150 mm,薯种芽眼至垄顶距离为120~140 mm为宜。一般而言,收获前薯垄周长控制在1100 mm左右,单位面积的种植株数视种植区域、品种和土壤肥沃程度的不同相应调整,一般控制在5~8株/m²,种植深度控制在120~180 mm之间^[3]。

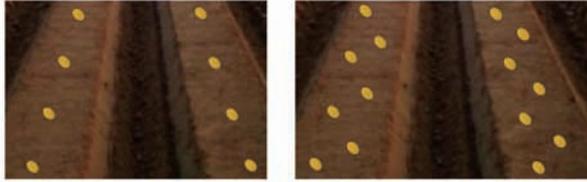


图 11 马铃薯垄作种植示意图

Fig. 11 Sketch of potato ridge planting

试验地位于山东省德州市乐陵市黄夹镇许家村,属暖温带半湿润大陆性季风气候(海拔10~12 m),年平均气温为12.4℃,年平均降水量为527.1 mm,年平均无霜期为198 d。种植模式为单垄单行种植,2018年3月上旬机械化播种作业,株距为200 mm。收获时的垄型参数是经2~3次中耕培土形成,收获前测得垄型参数为:垄高240 mm、垄顶宽度400 mm、垄周长900 mm、垄底宽度700 mm、垄间距900 mm。

试验田种植的马铃薯品种为“希森3号”,收获前采用机械杀秧。0~150 mm深度范围内的平均土壤紧实度为312.29 kPa,150~300 mm深度范围内的平均土壤紧实度为1072.39 kPa;土壤平均含水率为9.03%,土壤容重1.10 g/cm³。试验时间为2018年7月11日,田间收获试验现场如图12所示。



图 12 田间收获试验

Fig. 12 Field harvest test

3.2 试验设备

试验设备有:雷沃欧豹TG1254型拖拉机、马铃薯碰撞检测记录传感器(外壳热熔胶材质,三轴尺寸80 mm×90 mm×60 mm,质量270 g,采样频率0.488~5 kHz,内存为32 KB,工作环境温度为-29~60℃,频率响应范围为0.005~3 kHz,所能承受最大碰撞加速度为450 g,美国Techmark公司)、DHG101-2型电热恒温干燥箱(上虞市沪越仪器设备厂)、SPECTRUM SC-900型数字式土壤紧实度测量仪(量程为0~7000 kPa)、PCIRD软件(美国Techmark公司)和计算机,另外还有转速仪和卷尺等。

3.3 试验方法

田间试验参考NY/T 648—2015《马铃薯收获机质量评价技术规范》^[31]规定的检测方法进行,选定伤薯率、破皮率、纯工作时间生产率及含杂率等作为性能评价指标。同时,判断挖掘、松土限深调控、摆抖分离、过渡分离、薯秧分离、清土除杂和集薯输送等各个阶段的稳定性、可靠性及各阶段关键装置的协调配合性能。本文以马铃薯碰撞检测球为试验手段,获取马铃薯在整个收获环节各个流程的碰撞信息,找到联合收获机易产生破皮损伤的关键位置,其马铃薯碰撞检测系统如图13所示。



图 13 马铃薯碰撞检测系统

Fig. 13 Potato impact detection system

1. 计算机 2. 碰撞检测球 3. 数据线

在前期初步试验的基础上,田间收获试验时拖拉机选取A I和A II挡位,分别选取作业速度为 $v_{s1}=3.17$ km/h和 $v_{s2}=4.16$ km/h开展田间收获试验。试验过程中,首先将碰撞检测球置于田间作业收获机的挖掘铲上方的薯土混合物中,使其混流于马铃薯、土壤和秧蔓等之中,碰撞检测球在联合收获机中运行的轨迹等同于实际马铃薯的运动轨迹;记录碰撞检测球在收获机中到达各关键位置处的时间;待碰撞检测球从集薯装置末端的落料口处落下时取出,并将碰撞检测球数据传输至计算机;最后,将采集到的碰撞信息进行分析,结合碰撞次数分析整个收获过程中薯块的运动特点,评估机具易产生碰撞冲击的对应关键点。对于设计的基于多段分离工艺的联合收获机而言,经IRD软件即可对采集到的数据进行分析,并可对主要碰撞源进行较为直观的解析。碰撞冲击的评价是建立在对每次碰撞所产生的碰撞加速度 G 、碰撞持续时间 t 和速度变化值 Δv 进行计算分析的基础上,通过试验能够获得多种工况条件下的薯块碰撞、薯石碰撞、薯秆碰撞以及跌落冲击和在清土除杂装置的清土辊转动作用下的“跳跃”与“翻滚”所反映的运动特征。本文采集的最小临界碰撞加速度为20 g。

3.4 试验结果与分析

3.4.1 样机田间测试

基于马铃薯种植农艺及前期初步试验,样机田

间测试时选取的挖掘深度为 220 mm, 分离筛 I、分离筛 II 和分离筛 III 的驱动轴转速均为 180 r/min, 作业速度分别设定为 3.17 km/h 和 4.16 km/h, 其测试结果如表 2 所示。

表 2 样机评价指标测试结果

Tab. 2 Assessment index test result of prototype

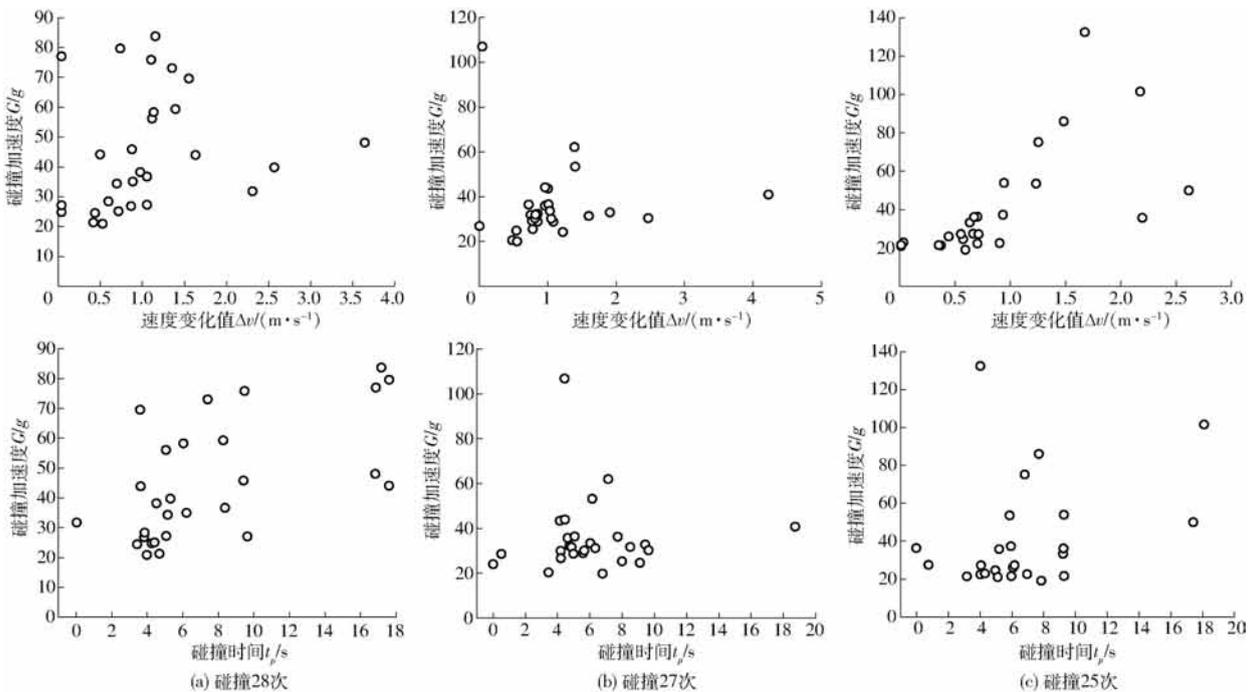
评价参数	测试结果		性能指标 ^[31]
	$v_{s1} = 3.17 \text{ km/h}$	$v_{s2} = 4.16 \text{ km/h}$	
损失率/%	1.64	1.59	≤ 4
伤薯率/%	1.72	1.48	≤ 2
破皮率/%	2.31	1.92	≤ 3
纯工作时间生产率/ ($\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.41	0.54	
含杂率/%	2.71	3.35	≤ 4

由表 2 可知, 各项性能指标均满足 NY/T 648—2015《马铃薯收获机质量评价技术规范》的要求。当作业速度由 3.17 km/h 提高至 4.16 km/h 时, 纯工作时间生产率由 0.41 hm^2/h 提高至 0.54 hm^2/h , 对应的伤薯率和破皮率明显降低, 但含杂率明显增加。这是由于在其他收获条件不变的情况下, 作业速度的增加使得单位时间内进入分离筛 I 和分离筛 II 甚至是清土除杂装置的薯土混合物总量增加, 导

致在同样的薯土分离条件下的薯-土-杂分离负担相对增加, 少许土块甚至在清土除杂装置后进入分离筛 III, 随后流入集薯装置而被输运至料斗车, 从而导致含杂率相对增加。因此, 处理好作业速度与收获效果的关系是控制破皮率、伤薯率以及含杂率的关键。另外, 联合收获机连续作业能力较佳, 挖掘、松土限深调控、摆抖分离、过渡分离、薯秧分离、清土除杂和集薯输送等各环节作业顺畅。

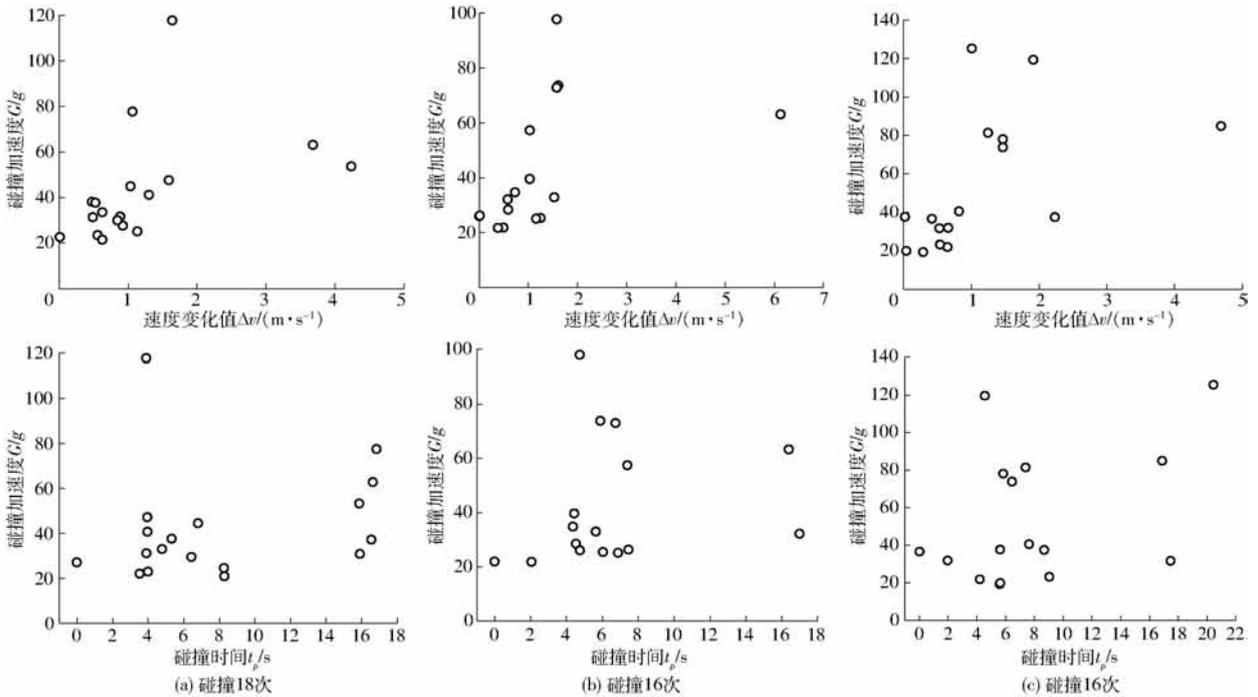
3.4.2 薯块碰撞特征采集与分析

在整个收获作业过程中, 马铃薯的破皮率、伤薯率及含杂率与薯土混合物在所划分的 A~D 这 4 个阶段所产生的碰撞冲击有着直接的关系。利用基于三轴加速度传感器原理的碰撞检测球, 对作业速度为 3.17 km/h 和 4.16 km/h 条件下的薯土混合物碰撞特征进行采集, 测得了各阶段的碰撞加速度 G 、碰撞持续时间 t 和速度变化值 Δv 等参数, 并存储于碰撞检测球中。为方便比较不同分离阶段的碰撞特征, 将试验球在分离筛上发生初次碰撞时的时间记作 0 时刻, 自初次碰撞之后, 其余各次碰撞的时间 t_p 在数值上即等于此次碰撞发生的真实时间与初次碰撞发生的时间之差。2 个作业速度条件下的马铃薯联合收获机薯块碰撞特征分别如图 14 和图 15 所示。

图 14 $v_{s1} = 3.17 \text{ km/h}$ 时薯块碰撞特征Fig. 14 Collision characteristics of potatoes at $v_{s1} = 3.17 \text{ km/h}$

结合图 14、15 可看出, 作业速度为 3.17 km/h 时, 从第 1 次碰撞至最后一次碰撞分别历时 17.19、18.74、18.09 s, 作业速度为 4.16 km/h 时, 从第 1 次碰撞至最后一次碰撞分别历时 16.84、17.04、20.44 s。3.17 km/h 和 4.16 km/h 时 3 组试验数据产生的较

大碰撞加速度分别为 83.78、107.03、132.29 g 和 117.91、97.86、125.24 g。分析可知, 随着作业速度的增加薯土混合物在分离筛上有效分离行程的处理负担加大, 薯土混合物来不及透筛, 相比于速度较慢时土块的破碎能力减弱, 在土壤的缓冲保护作用下

图 15 $v_2 = 4.16$ km/h 时薯块碰撞特征Fig. 15 Collision characteristics of potatoes at $v_2 = 4.16$ km/h

使得马铃薯的碰撞次数相对减少^[4,12]。另外,试验测得单次碰撞的碰撞持续时间为毫秒级,碰撞持续时间极短,即短时间内能够产生较大的瞬时碰撞加速度。收获过程中薯块与分离筛杆条等之间的瞬时碰撞接触,迫使薯块经历着弹性和塑性变形过程,进而影响着最终的收获品质^[32]。

试验过程中,自试验球放入薯土混合物中开始,利用秒表记录其到达各关键位置时的时间。因此,结合碰撞检测球记录的各次碰撞所对应产生的时间分析可知,分离筛 I 与分离筛 II 交接处及集薯输送装置的落料端均较易产生高幅值冲击,即这两个位置是易产生较大碰撞加速度的关键点。分离筛 I 和分离筛 II 交接处产生的高幅值冲击主要是由于分离筛 I 驱动轴位置与分离筛 II 存在的高度差所致,且由于分离筛 I 运行过程中存在一定的惯性冲击力。有研究表明:跌落高度与最大碰撞加速度之间存在着线性关系^[33]。在集薯装置的末端,较为密集的“薯块流”跌落过程中易产生碰撞冲击,从而易导致薯块之间相互擦伤和碰撞损伤。因此,进一步降低或根据收获需要调整分离筛 I 和分离筛 II 之间的高度差及进一步改善集薯输送装置装入料斗车末端的缓冲效果,是降低伤薯率和破皮率的有效措施。

由图 14 和图 15 可见,采集的速度变化值与碰撞加速度之间的关系并非呈现“线性”关系,这是由于在 A ~ D 这 4 个阶段的碰撞特征均具有较强的随机性所致,这与 YU 等^[34]研究蓝莓碰撞损伤得到的结论是一致的,即不能简单地用碰撞加速度的大小

来精确评估损伤程度。速度变化值是表征薯块碰撞接触表面硬度的重要指标,同样的碰撞加速度作用于不同的接触表面也会产生不同的潜在损伤影响,较硬的接触表面相对于较软的表面具有较小的速度变化值^[35]。对于本联合收获机而言,薯块与不同接触材料之间的碰撞具有不同的变形过程,即薯块与金属杆条之间的碰撞、薯块与薯块之间的碰撞乃至薯块与清杂轮橡胶指之间的碰撞均呈现不同的力学特性,这是由于不同碰撞接触表面的能量吸收特性存在差异性以及碰撞恢复系数不同所导致的^[6]。另外,即使单次碰撞产生的碰撞加速度较小,但当多频次碰撞时也会由于产生“累积效应”而产生不同程度的损伤,这与 XU 等^[35]研究商用蓝莓生产线碰撞损伤时得到的结论是一致的。

本次试验所采集的碰撞信息主要来自于相邻装置交接处的跌落碰撞、薯土分离环节因“摆抖”振动而产生的“跳跃”与“回流”导致的碰撞接触、清杂辊与光辊因反向转动使得薯块突然减速所产生的伴随着“翻滚”及“跳跃”现象的碰撞、集薯装置落料端密集“薯块流”之间的相互碰撞以及薯块跌落至料斗车时产生的“薯-薯”甚至“薯-石”碰撞等。由于分离筛 I 的有效分离行程较长,靠近挖掘铲位置处的薯土混合物数量较大,但后半段大部分土壤由于“摆抖”振动及杆条的透筛作用而分离使得薯土比例较大,部分薯块失去泥土的“包裹”作用而产生破皮甚至损伤,另外薯块产生的“回流翻滚”现象在一定程度上也会增加薯块与分离筛杆条之间的接触时

间,相当于延长了其输送分离行程,这也是薯块产生切线擦伤以及破皮损伤的主要原因之一;虽然分离筛Ⅱ和分离筛Ⅲ采用的是水平布置的杆条式分离方式,且没有施加其他的激振作用力,但由于分离筛Ⅱ与清土除杂装置交接处存在着高度差,两者之间的高度差虽具有一定的碎土效果、薯秧分离及杂草分离效果,但同时薯块过渡至清土除杂装置时由于跌落冲击易导致薯块的损伤破皮;由于利用光辊和清杂辊的反向转动而导致对薯块的阻挡以及清杂辊的摩擦揉搓作用实现清土除杂,且整个清土除杂装置呈倾斜状态布置,使得部分薯块会产生“跳跃”与“翻滚”现象,因此在清土除杂装置内易产生高频次碰撞冲击。薯块经分离筛Ⅲ输送至集薯分离装置时,分离筛Ⅲ末端与集薯输送装置虽然也存在着高度差,但是集薯输送装置的输送带由于采用弹性材料具有一定的缓冲作用,有利于减损控制。

4 结论

(1)设计的基于多段分离工艺的双垄双行马铃薯联合收获机可一次完成挖掘、松土限深调控、摆抖分离、过渡分离、薯秧分离、清土除杂和集薯输送装

车等作业,在提高生产率的同时大大减轻了劳动强度。作业速度为3.17 km/h和4.16 km/h时,样机的损失率分别为1.64%和1.59%,伤薯率分别为1.72%和1.48%,破皮率分别为2.31%和1.92%,生产率分别为0.41 hm²/h和0.54 hm²/h,满足NY/T 648—2015《马铃薯收获机质量评价技术规范》规定的各项指标要求。

(2)作业速度由3.17 km/h提高至4.16 km/h时,纯工作时间生产率由0.41 hm²/h提高至0.54 hm²/h,由于薯土混合物数量的加大增加了分离负担,部分薯土混合物来不及透筛,土块的破碎能力减弱,但在土壤的缓冲保护作用下使得马铃薯的碰撞次数相对减少,因此对应的伤薯率和破皮率明显降低,含杂率明显增加。

(3)利用碰撞检测球采集了两种作业速度条件下薯土混合物的碰撞特征,在对碰撞次数、所产生的碰撞加速度和速度变化值进行分析的基础上,得出分离筛Ⅰ与分离筛Ⅱ交接处及集薯输送装置的落料端均易产生高幅值冲击,因此,降低分离筛Ⅰ和分离筛Ⅱ之间的高度差以及进一步改善集薯装置装入料斗车末端的缓冲效果,是降低伤薯率和破皮率的有效措施。

参 考 文 献

- [1] 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. 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. LÜ Jinqing, SUN He, DUI 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. (in Chinese)
- [2] KEMPENAAR C, STRUIK P C. The canon of potato science:haulm killing[J]. Potato Research, 2008, 50(3): 341-345.
- [3] 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)
- [4] 贾晶霞. 马铃薯收获机关键部件设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2006. JIA Jingxia. Design and experiment study on the critical parts of potato harvesters[D]. Beijing:China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [5] 魏忠彩,李学强,孙传祝,等. 马铃薯收获与清选分级机械化伤薯因素分析[J]. 中国农业科技学报,2017,19(8):63-70. WEI Zhongcai, LI Xueqiang, SUN Chuazhu, et al. Analysis of potato mechanical damage in harvesting and cleaning and sorting storage[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(8): 63-70. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 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)
- [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/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):119-126. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160717&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.017. YANG Ranbing, YANG Hongguang, SHANG Shuqi, et al. Design and test of poking roller shoving type potato harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 119-126. (in Chinese)
- [9] 吴建民,李辉,孙伟,等. 拨指轮式马铃薯挖掘机试验[J]. 农业工程学报,2011,27(7):173-177.

- WU Jianmin, LI Hui, SUN Wei, et al. Experiment on poke finger wheel type potato digger[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 173 - 177. (in Chinese)
- [10] 杨然兵,杨红光,尚书旗,等. 马铃薯联合收获机立式环形分离输送装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(3): 10 - 18. 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, 2018, 34(3): 10 - 18. (in Chinese)
- [11] 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/OL]. 农业机械学报,2017,48(11): 156 - 164. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171119&journal_id = jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171119&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.019. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 156 - 164. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 戴飞,赵武云,孙伟,等. 马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(1):64 - 72. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170109&journal_id = jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170109&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.009. DAI Fei, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Design and experiment of combined operation machine for potato harvesting and plastic film pneumatic auxiliary collecting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 64 - 72. (in Chinese)
- [14] 戴飞,郭笑欢,赵武云,等. 帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(3):104 - 113. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180312&journal_id = jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180312&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.012. DAI Fei, GUO Xiaohuan, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of canvas belt combined operation machine for potato digging and plastic film collecting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 104 - 113. (in Chinese)
- [15] 桑永英,张东兴,贾晶霞,等. 马铃薯联合收获机输送臂系统的运动防碰仿真[J]. 农业机械学报,2007,38(11): 52 - 55. SANG Yongying, ZHANG Dongxing, JIA Jingxia, et al. Development of virtual prototype of potato harvester elevator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(11): 52 - 55. (in Chinese)
- [16] 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)
- [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] AZIZI P, DEHKORDI N S, FARHADI R. Design, construction and evaluation of potato digger with rotary blade[J]. Cercetari Agronomice in Moldova, 2014, 47(3): 5 - 13.
- [19] OPARA U L, PATHARE P B. Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce: a review[J]. Postharvest Biology & Technology, 2014, 91(5): 9 - 24.
- [20] TVAN C, TIJSKENS E, RAMON H, et al. Characterisation of a potato-shaped instrumented device[J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(3): 275 - 285.
- [21] CANNEYT T V, LANGENAKENS J, TIJSKENS E, et al. Characterisation of a potato-shaped instrumented tool to predict mechanical damage to potatoes[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2001, 34(28): 61 - 66.
- [22] YU Pengcheng, LI Changying, RAINS G, et al. Development of the berry impact recording device sensing system: software[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2011, 77(2): 195 - 203.
- [23] 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 Leiyong, 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)
- [24] CANNEYT T V, TIJSKENS E, RAMON H, et al. Development of a predictive tissue discolouration model based on electronic potato impacts[J]. Biosystems Engineering, 2004, 88(1): 81 - 93.
- [25] WEI Zhongcai, LI Hongwen, SUN Chuanzhu, et al. Experiment on the characteristics of dropping collision and harvesting of potatoes[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2018, 27(1): 99 - 111.
- [26] 贾晶霞,刘汉武,郝新明,等. 马铃薯收获机挖掘铲有限元静力学分析[J]. 农业机械学报,2006,37(9):86 - 88. JIA Jingxia, LIU Hanwu, HAO Xinming, et al. Finite element analysis for blade of potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9): 86 - 88. (in Chinese)

- DAI Li, SUN Liang, ZHAO Xiong, et al. Parameters optimization of separating-planting mechanism in transplanter based on kinematics objective function[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3): 35-42. (in Chinese)
- [19] 俞高红, 黄小艳, 叶秉良, 等. 旋转式水稻钵苗移栽机构的机理分析与参数优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 16-22. YU Gaohong, HUANG Xiaoyan, YE Bingliang, et al. Principle analysis and parameters optimization of rotary rice pot seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 16-22. (in Chinese)
- [20] 赵匀, 刘志平, 辛亮, 等. 水稻钵苗膜上移栽机构优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 87-93. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180410&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.010. ZHAO Yun, LIU Zhiping, XIN Liang, et al. Optimization design and experiment of transplanting mechanism of rice pot seedling on film[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 87-93. (in Chinese)
- [21] 周淑霞. 加工番茄育苗移栽机采高产栽培技术[J]. 新疆农垦科技, 2016(4): 24-26.
- [22] 王秀峰, 陈振德. 番茄工厂化育苗[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] 宫成宇. 多功能钵苗移栽试验台设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013. GONG Chengyu. Test-bed design and experiment research on multi-function transplanting machine[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [24] 中华人民共和国工业和信息化部. JB/T 10291—2013 旱地栽植机械行业标准[S]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [25] 封俊, 顾世康, 曾爱军, 等. 导苗管式栽植机的试验研究(II)栽植机的性能评价指标与检测方法[J]. 农业工程学报, 1998, 14(2): 73-77. FENG Jun, GU Shikang, ZENG Aijun, et al. Study on transplanter with chute and seedling aid springs (part II) judging-targets system for transplanters[J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(2): 73-77. (in Chinese)
- [26] 俞高红, 廖振飘, 徐乐辉, 等. 大株距行星轮系蔬菜钵苗栽植机构优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 38-44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150706&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.006. YU Gaohong, LIAO Zhenpiao, XU Lehui, et al. Optimization design and test of large spacing planetary gear train for vegetable pot-seedling planting mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 38-44. (in Chinese)

(上接第 140 页)

- [27] 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.
- [28] 王家胜, 尚书旗. 自走式双行胡萝卜联合收获机的研制及试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 38-43. WANG Jiasheng, SHANG Shuqi. Development and experiment of double-row self-propelled carrots combine[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12): 38-43. (in Chinese)
- [29] 顾峰玮, 胡志超, 吴惠昌, 等. 4LT-A型错行作业挖掘甜菜联合收获机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 1-9. GU Fengwei, HU Zhichao, WU Huichang, et al. Development and experiment of 4LT-A staggered-digsugar beet combine[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 1-9. (in Chinese)
- [30] 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)
- [31] 全国农业机械标准化技术委员会. NY/T 648—2015 马铃薯收获机质量评价技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [32] LOPEZ-MAESTRESLAS A, KERESZTES J C, GOODARZI M, et al. Non-destructive detection of blackspot in potatoes by vis-NIR and SWIR hyperspectral imaging[J]. Food Control, 2016, 70(12): 229-241.
- [33] YU Pengcheng, LI Changying, RAINS G, et al. Development of the berry impact recording device sensing system: hardware design and calibration[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2011, 79(2): 103-111.
- [34] YU Pengcheng, LI Changying, TAKEDA, et al. Visual bruise assessment and analysis of mechanical impact measurement in southern highbush blueberries[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2014, 30(1): 29-37.
- [35] 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(12): 103-113.