

4U-1600型集堆式马铃薯挖掘机设计与试验

杨小平¹ 魏宏安¹ 赵武云¹ 姜彦武² 戴立勋¹ 黄晓鹏¹

(1. 甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070; 2. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 针对传统一级升运链马铃薯挖掘机土薯分离效果差、人工捡拾铺条劳动强度大的作业难题, 设计了4U-1600型集堆式马铃薯挖掘机。对挖掘机阶梯挖掘铲、两级升运链式土薯分离输送装置及液压开启式集薯箱等关键部件进行设计与选型, 并完成其关键参数的计算确定。以样机前进速度、一级土薯分离装置线速度和二级土薯分离升运装置线速度为自变量, 以明薯率和伤薯率为响应值, 依照Box-Behnken试验设计原理, 采用三因素三水平响应面分析方法, 分别建立了各因素与明薯率、伤薯率之间的数学模型, 并对各因素及其交互作用进行分析。试验结果表明, 对明薯率影响的主次顺序依次为二级土薯分离升运装置线速度、样机前进速度和一级土薯分离装置线速度, 对伤薯率影响的主次顺序依次为一级土薯分离装置线速度、二级土薯分离升运装置线速度和样机前进速度; 马铃薯挖掘机最佳工作参数为: 样机前进速度1.50 m/s、一级土薯分离装置线速度1.37 m/s、二级土薯分离升运装置线速度0.89 m/s。验证试验表明, 4U-1600型集堆式马铃薯挖掘机作业后, 明薯率为95.11%、伤薯率为3.36%, 性能试验指标均达到国家行业标准要求, 表明在优化工作参数条件下该作业机能够提升马铃薯机械化收获质量。

关键词: 马铃薯; 挖掘机; 土薯分离升运装置; 集堆式; 试验

中图分类号: S225.7⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)06-0083-10

OSID:



Design and Experiment of 4U-1600 Set of Pile Type Potato Digger

YANG Xiaoping¹ WEI Hongan¹ ZHAO Wuyun¹ JIANG Yanwu² DAI Lixun¹ HUANG Xiaopeng¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Aiming at the poor separation effect and artificial pick up potato labor intensity of the one stage lift chain potato digger, the 4U-1600 set of pile type potato digger was designed. Based on the prototype designed and selected of key operation parts, and the structure and operation parameters of ladder digging blade, two stage lifting chain soil-potato separating and conveying device and hydraulic open type potato collecting box were determined. For further study of the improved working performance of set of pile type potato digger, the Box-Behnken experimental design with three factors and three levels was performed, parameters such as forward velocity, one stage soil-potato separating and conveying device velocity and two stage soil-potato separating and conveying device velocity were selected as independent variables, which would influence the potato obvious rate and potato injury rate. The mathematical model was established, and then the effects of various parameters and their interactions were analyzed as well. The test results showed that effects orders of three parameters on the potato obvious rate from primary to secondary were as follows: two stage soil-potato separating and conveying device velocity, forward velocity and one stage soil-potato separating and conveying device velocity. And effects orders of three parameters on the potato injury rate from primary to secondary were as follows: one stage soil-potato separating and conveying device velocity, two stage soil-potato separating and conveying device velocity and forward velocity. The optimal working parameters were forward velocity of 1.50 m/s, one stage soil-potato separating and conveying device velocity of 1.37 m/s and two stage soil-potato separating and conveying device velocity of 0.89 m/s. Confirmatory tests showed that the average value of the potato

收稿日期: 2019-09-20 修回日期: 2019-12-01

基金项目: 甘肃省高等学校科研项目(2018D-15、2017D-13)

作者简介: 杨小平(1979—), 男, 副教授, 主要从事农业工程技术与装备研究, E-mail: yangxp@gsau.edu.cn

通信作者: 魏宏安(1960—), 男, 教授, 主要从事农业工程技术与装备研究, E-mail: weiha@gsau.edu.cn

obvious rate and the potato injury rate were 95.11% and 3.36% , which were up to the relevant work quality evaluation specification requirements , and the experimental results met the design requirements of potato digger.

Key words: potato; digger; soil – potato separating and conveying device; set of pile type; experiment

0 引言

马铃薯机械化收获是实现马铃薯全程机械化生产的关键环节,可提高其作业效率,确保增产增收^[1-4]。国外发达国家多采用自动化、智能化程度较高的马铃薯联合收获机进行收获作业。该类收获机大多为侧臂输出式和分级装袋式,具有多种、多级的输送分离装置,生产效率高、收获薯块质量好,但一般在大面积耕地上使用,不适用于我国西北马铃薯主产区的中小地块,且存在机器价格高等问题^[5-7]。国内主要以中小型一级升运链条铺式马铃薯挖掘机进行分段收获作业,需耗费大量的人力捡拾铺放于地面的薯块,其劳动强度大、生产效率较低。近年来,随着中国马铃薯种植面积和产量的快速增长及人工成本的大幅上升,提高马铃薯机械化收获效率与质量、减少人力消耗已成为我国马铃薯收获机械化发展需要解决的主要难题^[8-9]。

目前,国内中小型马铃薯挖掘机普遍采用“杀秧—挖掘—土薯分离—铺放—人工捡拾”分段收获作业模式,其中,土薯分离装置按结构形式分为拨辊推送式、拨指轮式、立式环形分离式和升运链式等^[10-13],升运链式是当前应用最广、故障率低、作业性能较稳定的土薯分离装置。本文基于阶梯挖掘铲、两级升运链式土薯分离输送装置、液压开启式集薯箱等,设计4U-1600型集堆式马铃薯挖掘机,对其关键作业部件进行计算分析,并通过田间试验确定最佳工作参数组合,以期有效提升土薯分离效果与薯块捡拾效率。

1 整机结构与工作原理

1.1 结构组成

设计的4U-1600型集堆式马铃薯挖掘机与动力为58.8~88.2 kW的拖拉机配套,通过半悬挂方式连接。整机结构主要由仿形碎土装置、阶梯铲挖掘装置、两级升运链式土薯分离输送装置、茎秆分离装置、薯块堆放装置、液压开启装置、传动系统、机架以及地轮、牵引机构等部分组成,样机具体结构如图1a、1b所示。

其中,阶梯挖掘铲为三阶平面组合结构;两级升运链式土薯分离输送装置主要由一级土薯分离装置、二级土薯分离升运装置组成,一级土薯分离装置

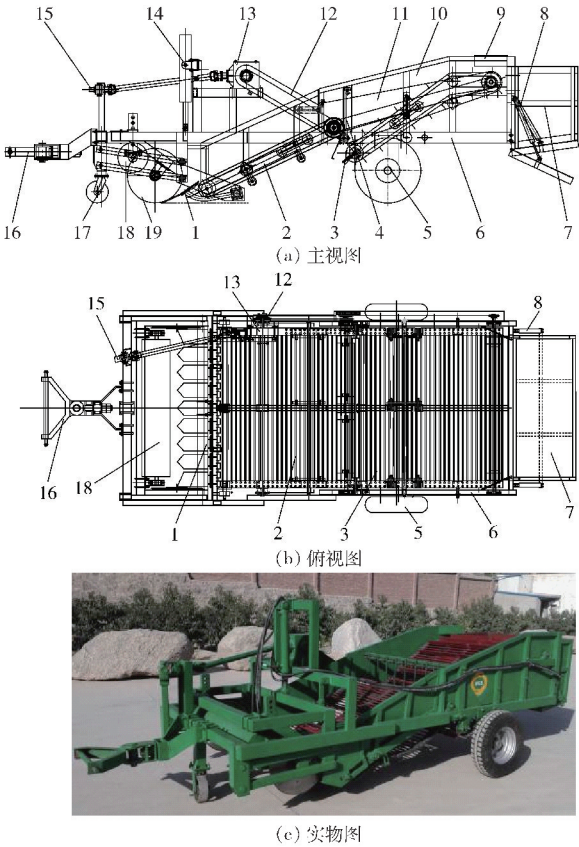


图1 4U-1600型集堆式马铃薯挖掘机

Fig.1 4U-1600 set of pile type potato digger

- 1. 挖掘部件组合 2. 一级土薯分离装置 3. 二级土薯分离升运装置 4. 茎秆分离装置 5. 行走装置 6. 机架 7. 集装箱 8. 液压开启装置 9. 导薯板 10. 侧壁板 11. 链防护罩 12. 传动链 13. 变速箱 14. 挖掘深度调整装置 15. 动力输入轴 16. 牵引装置 17. 支撑轮组合 18. 仿形碎土装置 19. 切土圆盘

为皮带栅杆式,二级土薯分离升运装置设计为栅杆刮板式;集装箱由液压油缸装置间歇式开启与关闭。

1.2 工作原理

4U-1600型集堆式马铃薯挖掘机传动系统如图2所示,箭头指示方向为动力传递方向,拖拉机动动力经万向传动轴传递到变速箱,经变速箱变速换向后先分别传递至一级土薯分离装置与茎秆分离装置处,并随后进一步传输动力至二级土薯分离升运装置。

作业时,集堆式马铃薯挖掘机由拖拉机提供动力,在仿形镇压辊压碎表层土块的同时,作业机两侧的切土圆盘刀切开土壤及薯秧杂草,以防挖掘组合部件处壅土和缠草。阶梯挖掘铲将膜-土-薯复合体同时疏松掘起并送至一级土薯分离输送装置,膜-土-薯复合体经杆带式土薯分离装置的抖动、输送,

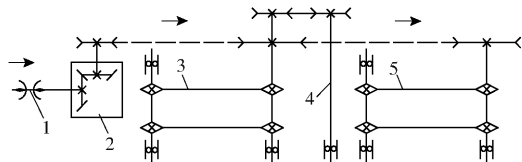


图 2 挖掘机传动系统示意图

Fig.2 Schematic of transmission system

1. 传动轴 2. 变速箱 3. 一级土薯分离装置 4. 茎秆分离装置
辊轴 5. 二级土薯分离升运装置

将大部分土壤和夹杂物筛落，薯块、地膜、薯秧及少量紧实土块被继续输送，并在茎秆分离装置的作用下薯秧、地膜及杂草被分离并抛落于地面，挖掘薯块及少许硬土块继续进入二级土薯分离升运装置，此时土块被进一步筛分，而薯块升运至携有液压开启装置的集料箱内，并在集料箱底板的间歇式开启下实现马铃薯地面集堆式收获。

1.3 主要技术指标

设计的 4U-1600 型集堆式马铃薯挖掘机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 作业机主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of operation machine

参数	数值/型式
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	5 200×2 030×1 550
工作幅宽/mm	1 600
整机质量/kg	2 500
配套动力/kW	58.8~88.2
挂接方式	牵引式

2 关键部件设计与参数确定

2.1 阶梯挖掘铲

依据课题组前期研究^[5,14]，设计的阶梯挖掘铲结构如图 3 所示，阶梯挖掘铲既要入土阻力小，又要有良好的碎土性能，保证在挖掘作业过程中膜-土-薯复合体进入土薯抖动升运装置前能够将三者进行初步疏松作业，打破覆盖在薯块顶部的“膜-土”板结层，满足掘起物料的顺利后输。阶梯

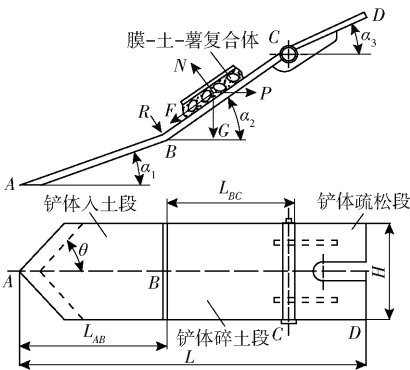


图 3 阶梯挖掘铲示意图

Fig.3 Schematic of ladder digging blade

挖掘铲为分体式三阶平面组合结构，通过 3 组不同的铲面倾角(α₁、α₂、α₃)，分别实现挖掘机低减阻入土、高性能碎土及膜-土-薯疏松过程^[14]。

由图 3 可以看出，阶梯挖掘铲的入土段、碎土段及膜-土-薯复合体疏松段皆与铲面不同作业功能段的倾角 α 有关，根据膜-土-薯复合体在铲体不同功能段的移动条件可建立方程^[15]

$$\begin{cases} P\cos\alpha - F - G\sin\alpha \geq 0 \\ N - G\cos\alpha - P\sin\alpha = 0 \end{cases}$$

(1)

其中 $F = \mu N$

(2)

式中 P——沿着阶梯挖掘铲移动膜-土-薯复合体所需要的力,N

F——铲面与膜-土-薯复合体摩擦力,N

N——阶梯挖掘铲对膜-土-薯复合体的反作用力,N

G——铲面上膜-土-薯复合体重力,N

μ——膜-土-薯复合体与阶梯挖掘铲的摩擦因数

α——铲面不同作业功能段的倾角,(°)

由式(1)、(2)计算得出

$$\alpha = \arctan \frac{P - \mu G}{G + \mu P}$$

(3)

根据式(3)可以得出，当阶梯挖掘铲面倾角 α 变小时，膜-土-薯复合体沿着阶梯挖掘铲移动所需的力变小，挖掘阻力小，入土性能好，但易出现壅土现象，碎土性能差；当阶梯挖掘铲面倾角 α 变大时，碎土性能好，但挖掘阻力大^[5]。

为保证阶梯挖掘铲铲刃的自动清理，铲刃斜角、膜-土-薯复合体与阶梯挖掘铲的摩擦因数应满足^[15]

$$\begin{cases} 90^\circ - \theta > \varphi \\ \mu = \tan\varphi_{\max} \end{cases}$$

(4)

式中 θ——阶梯挖掘铲铲刃斜角，为 50°

φ——膜-土-薯复合体与阶梯挖掘铲的摩擦角,(°)

φ_{max}——膜-土-薯复合体与阶梯挖掘铲的最大摩擦角,(°)，取临界值

由式(4)计算得出，φ_{max} = 40°，μ = 0.84。

马铃薯收获机挖掘铲倾角 α 一般应在 14° ~ 25° 之间^[2]。因此，依照式(1) ~ (4)的计算分析与阶梯挖掘铲实现的不同功能要求，取铲体总长 L = 420 mm，铲宽 H = 110 mm。其中，铲体 AB 段倾角应取较小值，α₁ 取 14° ~ 18°、L_{AB} = 225 mm；中部铲体 BC 段倾角增大有利于碎土，α₂ 取 21° ~ 25°，为降低挖掘阻力，同时缩短铲体长度，取 L_{BC} = 125 mm；为使受到挤压的膜-土-薯复合体折弯疏松，铲体 CD

段倾角应取较小值, α_3 取 $12^\circ \sim 15^\circ$ 。为防止阶梯挖掘铲前部铲刃受力过大而出现应力集中, 铲体 AB 段与 BC 段过渡处以 $R = 10\text{ mm}$ 的加工圆弧过渡, 铲体 CD 段通过销钉与主铲体铰接。挖掘铲架与机架通过平行四杆机构铰接, 以保证不同挖掘深度时挖掘铲的最佳入土角不变, 挖掘铲架通过液压油缸控制升降。

课题组前期研究表明, 阶梯挖掘铲在作业时一般受大田土壤的法向力、重力和摩擦力三者的作用。应用 ANSYS 有限元法对确定了结构参数的阶梯挖掘铲进行仅考虑土壤法向力作用下的强度校核, 设置载荷为垂直于铲面的法向力 $1\,214\text{ N}$, 其位移变形云图和应力云图如图 4 所示^[16]。

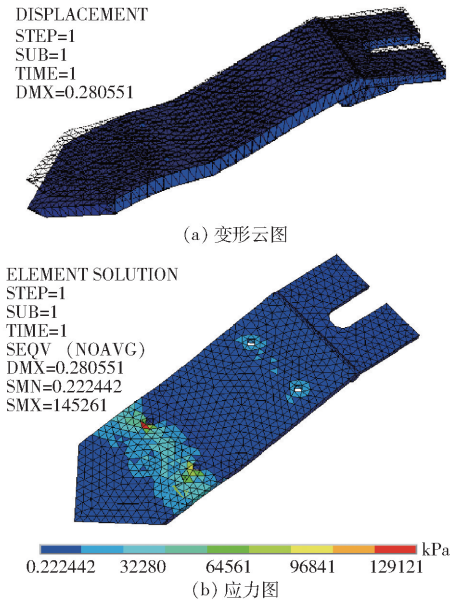


图 4 阶梯挖掘铲有限元分析结果

Fig.4 Finite element analysis results of ladder digging blade

通过阶梯挖掘铲有限元分析可知(图 4), 在阶梯挖掘铲尖和铲尾发生翘曲变形较明显, 其位移达到 $0.280\,551\text{ mm}$; 铲体入土段后半部分及铲体碎土段两螺纹孔处产生较大应力(最大值为 $145\,261\text{ kPa}$), 该值小于挖掘铲所选材料的屈服极限强度 235 MPa , 因此阶梯挖掘铲的设计合理可靠。

2.2 两级升运链式土薯分离输送装置

如图 5 所示, 两级升运链式土薯分离输送装置主要由一级土薯分离装置与二级土薯分离升运装置组成。其中, 一级土薯分离装置为皮带栅杆式, 抖动装置设计为被动三角轮抖动和杠杆摆臂式抖动组合装置, 在保证薯块和薯秧与土壤有效分离的前提下, 最大限度地减小对薯块的蹭皮损伤; 二级土薯分离升运装置为栅杆刮板式, 主要功能是进一步分离土壤, 同时将薯块提升到能够装箱的高度。

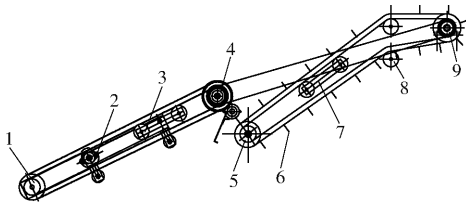


图 5 两级升运链式土薯分离输送装置结构简图

Fig.5 Schematic of two stage lifting chain soil - potato separating and conveying device

- 1. 一级抖动轮 2. 三角抖动轮 3. 杠杆摆臂式支撑辊 4. 一级主动轮 5. 二级从动轮 6. 刮板 7. 抖动装置 8. 托带轮 9. 二级主动轮

2.2.1 一级土薯分离装置

一级土薯分离装置的振动频率、振幅和线速度是影响其作业性能的主要参数, 也是影响薯块损伤率和分离率的重要因素。合理的线速度是挖掘土薯输送、分离顺畅的保证。通常用速比 λ 来确定土薯分离输送带的线速度

λ = v_p / v_r1 (5)

式中 v_p ——样机前进速度, m/s
 v_{r1} ——土薯分离输送带线速度, m/s

λ 取值一般为 $0.8 \sim 2.5$, 输送带杆的线速度取值根据实际作业情况的不同, 差异也较大, 为避免薯块在皮带栅杆上堆积而影响去土效果, 杆带速度应略高于机组行进速度, 但也不能过高, 否则薯块表皮容易产生擦皮损伤。相关研究表明, v_{r1} 为 $1.15 \sim 1.85\text{ m/s}$ 时土薯分离效果较好^[17]。因此, 为保证较高的马铃薯收获质量和生产率, 集堆式马铃薯挖掘机作业速度应控制在 $1.10 \sim 1.80\text{ m/s}$ 。

因三角抖动轮为被动式, 故输送带的抖动频率 f 与输送带杆线速度关系为^[15]

f = 3v_r1 / (2πr) (6)

式中 r ——三角抖动轮内切基圆半径, 取 90 mm
皮带栅杆输送带的抖动频率能够直接影响薯块损伤程度和土薯分离效果, 依据式(6)获得输送带的抖动频率为 $6 \sim 8\text{ Hz}$ 。

振幅直接影响薯土分离的效果, 亦对薯块损伤率产生相应的影响, 要达到较好的薯土分离效果, 同时减小对薯块的损伤, 振幅应保持在一定的范围内。国内三角抖动轮的振幅一般为 $10 \sim 40\text{ mm}$ ^[18-19], 本机抖动轮振幅设计为 15 mm 。

2.2.2 二级土薯分离升运装置

为了兼顾薯块升运和土薯进一步分离, 设计了栅杆刮板式二级土薯分离升运装置, 主要由栅杆刮板式分离输送带、主动轮、从动轮及支撑轮等部件构

成,结构如图 6 所示。

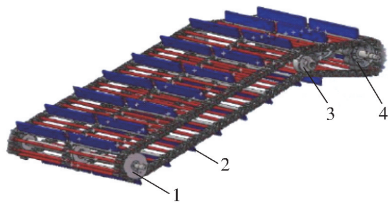


图 6 二级土薯分离升运装置结构简图

Fig. 6 Schematic of two stage soil - potato separating and conveying device

1. 二级从动轮 2. 栅杆刮板式分离输送带 3. 支撑轮 4. 二级主动轮

影响二级土薯分离升运装置的主要工作参数有分离输送带线速度、升运装置倾角、刮板高度。由于二级土薯分离升运装置上输送物料主要以马铃薯薯块为主,因此输送物料参数近似取马铃薯相关参数,栅杆刮板输送带线速度 v_{r2} 为

$$v_{r2} = \frac{Q}{3\,600 S \kappa \rho}$$

(7)

其中

$$S = ab$$

式中 Q ——刮板输送带输送量,取 $2.8 \times 10^4 \text{ kg/h}^{[5]}$
 S ——刮板升运输送带上物料填充的横截面积, m^2
 b ——输送带宽度,取 1.40 m
 a ——薯块平均公称直径,取 0.10 m
 κ ——输送物料填充系数,取 0.60
 ρ ——物料密度,取 105 kg/m^3

根据文献[18]并通过田间试验,在该栅杆刮板式分离升运装置中,当刮板高度大于等于 60 mm 、输送速度为 $0.8 \sim 1.0 \text{ m/s}$ 、倾斜角小于等于 36° 时,直径小于等于 130 mm 的薯块输送较平稳,不易伤薯,且能取得较好的土薯分离效果。

2.3 液压开启式集薯箱

2.3.1 结构组成

如图 7 所示,液压开启式集薯箱安装在挖掘机尾部,主要由机架、液压开启装置、开启板、箱底侧板和集装箱体等组成。当挖掘机田间作业时,薯块在二级土薯分离升运装置末端以一定的速度抛出,并落入集箱体内部。

2.3.2 结构参数确定

考虑到挖掘机整机长度不能过大及液压油缸安装等问题,设计集薯箱长度为 $1\,200 \text{ mm}$,宽度为 600 mm ;考虑到机具作业过程中卸料不停车,为避免集薯箱底闭合时伤薯,设计箱底表面为倾斜表面,倾斜角为 8° ,选用 SG1-E25 $\times 320$ 双作用单耳型单活塞杆液压缸,缸筒内径为 25 mm ,活塞杆外径为 14 mm ,额定压力为 16 MPa ,最大行程为 320 mm 。

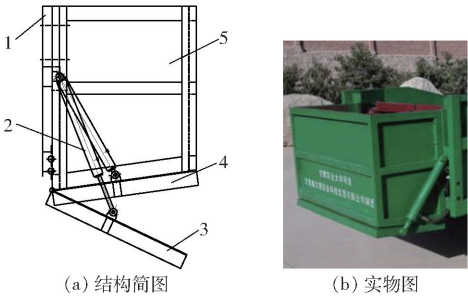


图 7 液压开启式集薯箱

Fig. 7 Hydraulic open type potato collecting box

1. 机架 2. 液压开启装置 3. 开启板 4. 箱底侧板 5. 集装箱体

集薯是马铃薯挖掘机的主要工作过程,对马铃薯薯损伤率有较大影响。经二级土薯分离升运装置末端抛出的薯块,抛出瞬间受重力、离心力共同作用的影响,为研究薯块下落时的运行轨迹和落入收集装置时的受力特性,选一薯块作为研究对象,如图 8 所示。

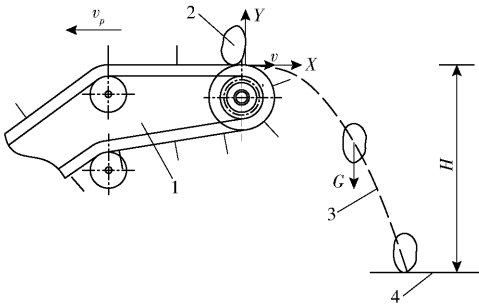


图 8 集薯过程示意图

Fig. 8 Structure diagram of potato collection process

1. 二级土薯分离升运装置 2. 马铃薯薯块 3. 薯块运行轨迹 4. 集薯箱底部

薯块在二级土薯分离升运装置末端以一定速度 v 抛出,在运动过程中只受重力作用(忽略空气阻力),做匀变速曲线运动,由抛出运动方程和薯块运动参数可求得薯块的运动轨迹。以薯块抛出时与栅杆的瞬时接触位置作为坐标原点建立直角坐标系。初速度 v 沿水平方向,薯块脱离装置后仅受大小不变、方向向下的重力,水平方向不受力,从最高点做下抛运动,下落至集箱体底部。则有位移运动方程

$$\begin{cases} x = (v - v_p) t \\ H = -vt + \frac{1}{2}gt^2 \end{cases}$$

(8)

式中 x ——薯块水平运动位移, mm
 H ——集薯箱高度, mm
 g ——重力加速度, m/s^2
 t ——薯块下落时间, s

由式(8)可得

$$H = \frac{g}{2(v - v_p)^2}x^2 - \frac{v}{v - v_p}x$$

(9)

依据式(9)可以看出,集薯箱高度与二级土薯分离升运装置线速度、挖掘机前进速度有关,考虑到选用液压缸的安装尺寸及箱底倾角,确定集薯箱的高度为 800 mm。依据马铃薯与钢板之间相关动摩擦角均值及集装箱开启板离地面高度^[19],开启板开合角度范围取 15°~56°。

3 田间试验

3.1 试验条件

2018 年 10 月在甘肃省定西市安定区鲁家沟镇小岔口村马铃薯机械化种植示范点进行集堆式挖掘机田间作业性能试验。试验地为全覆膜垄播旱地种植模式,土壤含水率为 14%~18%,各个试验区的长度和宽度分别在 100 m 和 50 m 以上;垄播试验地垄宽 900 mm,沟宽 450 mm,垄高 150 mm。结薯深度小于 250 mm,地膜为厚度 0.01 mm 的黑色膜。马铃薯品种为陇薯 3 号,试验时马铃薯植株、叶片枯萎,薯秧、杂草、地膜未清除。

3.2 试验方法

按照样机预期实现的设计功能,结合国家行业标准 NY/T 2464—2013《马铃薯收获机作业质量》规定的试验方法进行 4U-1600 型集堆式马铃薯挖掘机田间作业性能试验(图 9),试验样机配套动力为 58.8 kW 的约翰迪尔 JD-804 型拖拉机,作业速度控制在 1.10~1.80 m/s^[20]。其中,选取马铃薯挖掘机明薯率、伤薯率作为试验现场能够体现整机工作性能的测试指标,同时考察阶梯挖掘铲、两级升运链式土薯分离输送装置及液压开启式集薯箱的工作运转情况^[21]。

规定试验小区以单一垄体宽度为基准,测定区



(a) 试验样机



(b) 作业过程

图 9 挖掘机田间作业性能试验

Fig.9 Field performance test of potato digger

长度为 20 m,试验小区在试验地中随机选取,挖掘试验重复 6 次,试验结果取 6 次试验测定指标的平均值。

3.3 响应曲面法试验方案

由关键部件计算结果分析可知,集堆式马铃薯挖掘机前进速度、一级土薯分离装置线速度与二级土薯分离升运装置线速度的匹配是影响挖掘机工作性能的重要参数。试验过程中,挖掘机前进速度由拖拉机挡位及油门控制,一级土薯分离装置线速度与二级土薯分离升运装置线速度通过更换不同直径主、从动轮,改变传动比来调节。为此,采用 Box- Behnken 试验设计原理^[22-23],以样机前进速度(x_1)、一级土薯分离装置线速度(x_2)和二级土薯分离升运装置线速度(x_3)为自变量,明薯率(Y_1)和伤薯率(Y_2)为响应值,各试验因素编码如表 2 所示,分别实施 17 组响应面分析试验,如表 3 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 2 因素编码

Tab.2 Coding of factors

编码	因素		
	样机前进速度 $x_1/(m\cdot s^{-1})$	一级土薯分离装 置线速度 $x_2/$ ($m\cdot s^{-1}$)	二级土薯分离升运 装置线速度 $x_3/$ ($m\cdot s^{-1}$)
-1	1.10	1.15	0.80
0	1.45	1.50	0.90
1	1.80	1.85	1.00

表 3 响应面试验设计与结果

Tab.3 Response surface test design and results

试验号	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	0	-1	1	93.52	3.72
2	-1	1	0	87.36	4.43
3	0	0	0	96.53	3.36
4	0	0	0	96.12	3.15
5	1	0	-1	86.37	2.91
6	1	1	0	89.28	3.74
7	0	1	-1	86.11	4.44
8	0	0	0	95.83	3.18
9	-1	-1	0	85.67	2.82
10	0	1	1	93.32	4.56
11	0	-1	-1	91.25	2.67
12	1	-1	0	90.49	3.14
13	-1	0	1	86.62	3.81
14	0	0	0	96.51	3.26
15	-1	0	-1	91.32	2.95
16	1	0	1	95.66	3.88
17	0	0	0	93.23	3.16

4 试验结果与分析

4.1 回归模型的建立及检验

借助 Design-Expert 8.0.6 软件对明薯率 Y_1 和伤

薯率 Y_2 进行回归模型的方差分析, 如表 4 所示, 分别得到 Y_1 和 Y_2 二次回归模型为

$$Y_1 = 95.64 + 1.35X_1 - 0.61X_2 + 1.76X_3 - 4.25X_1^2 - 3.19X_2^2 - 1.40X_3^2 - 0.73X_1X_2 + 3.50X_1X_3 + 1.23X_2X_3 \quad (10)$$

$$Y_2 = 3.22 - 0.042X_1 + 0.60X_2 + 0.37X_3 - 0.075X_1^2 + 0.39X_2^2 + 0.24X_3^2 - 0.25X_1X_2 + 0.027X_1X_3 - 0.23X_2X_3 \quad (11)$$

表 4 回归方程方差分析

Tab.4 Variance analysis of regression equation						
试验指标	变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
明薯率	回归	238.81	9	26.53	11.81	0.001 8 **
	X_1	14.66	1	14.66	6.53	0.037 8 *
	X_2	2.95	1	2.95	1.31	0.289 3
	X_3	24.75	1	24.75	11.02	0.012 8 *
	X_1X_2	2.10	1	2.10	0.94	0.365 5
	X_1X_3	48.93	1	48.93	21.78	0.002 3 **
	X_2X_3	6.10	1	6.10	2.72	0.143 3
	X_1^2	76.08	1	76.08	33.87	0.000 7 **
	X_2^2	42.93	1	42.93	19.11	0.003 3 **
	X_3^2	8.26	1	8.26	3.68	0.096 6
	残差	15.72	7	2.25		
	失拟	8.10	3	2.70	1.42	0.361 3
	误差	7.62	4	1.91		
	总和	254.54	16			
伤薯率	回归	5.44	9	0.60	33.63	<0.000 1 **
	X_1	0.014	1	0.014	0.80	0.399 5
	X_2	2.90	1	2.90	161.68	<0.000 1 **
	X_3	1.12	1	1.12	62.63	<0.000 1 **
	X_1X_2	0.26	1	0.26	14.20	0.007 0 **
	X_1X_3	3.02×10^{-3}	1	3.02×10^{-3}	0.17	0.693 8
	X_2X_3	0.22	1	0.22	12.04	0.010 4 *
	X_1^2	0.024	1	0.024	1.31	0.290 0
	X_2^2	0.62	1	0.62	34.79	0.000 6 **
	X_3^2	0.24	1	0.24	13.53	0.007 9 **
	残差	0.13	7	0.018		
	失拟	0.094	3	0.031	4.03	0.105 9
	误差	0.031	4	7.82×10^{-3}		
	总和	5.56	16			

注: ** 表示差异极显著 ($P \leq 0.01$); * 表示差异显著 ($P \leq 0.05$)。

由表 4 可知, 二次回归模型(式(10))的 $P = 0.001\,8$, 表明回归模型极显著; 失拟项 $P > 0.05$, 失拟不显著, 说明模型所拟合的二次回归方程与实际相符合, 能正确反映明薯率 Y_1 与 X_1 、 X_2 、 X_3 之间的关系, 回归模型可以较好地对优化试验中各种试验结果进行预测。其中模型的一次项 X_1 (样机前进速度) 和 X_3 (二级土薯分离升运装置线速度) 影响显著; 二次项 X_1^2 、 X_2^2 影响极显著; 交互项 X_1X_3 影响极显

著, 其余各项均不显著。根据模型各因素回归系数的大小, 可得到各因素对明薯率的影响主次顺序为: X_3 、 X_1 、 X_2 , 即二级土薯分离升运装置线速度、样机前进速度、一级土薯分离装置线速度。

同时, 二次回归模型(式(11))的 $P < 0.000\,1$, 表明回归模型极显著; 失拟项 $P > 0.05$, 失拟不显著, 也说明模型所拟合的二次回归方程与实际相符合, 能正确反映伤薯率 Y_2 与 X_1 、 X_2 、 X_3 之间的关系, 回归模型可以较好地对优化试验中各种试验结果进行预测。其中模型的一次项 X_2 (一级土薯分离装置线速度) 和 X_3 (二级土薯分离升运装置线速度) 影响极显著; 二次项 X_2^2 、 X_3^2 影响极显著; 交互项 X_1X_2 影响极显著, X_2X_3 影响显著, 其余各项均不显著。根据模型各因素回归系数的大小, 可得到各因素对伤薯率的影响主次顺序为: X_2 、 X_3 、 X_1 , 即一级土薯分离装置线速度、二级土薯分离升运装置线速度、样机前进速度。

4.2 模型交互项的解析

响应曲面的形状能够反映出交互因素作用的强弱, 根据回归模型分别作出影响显著的各交互因素与明薯率、伤薯率之间关系的响应面图(图 10 ~ 12)^[24-25], 并结合响应曲面形状对影响明薯率、伤薯率变化趋势较大的试验因素进行分析说明。

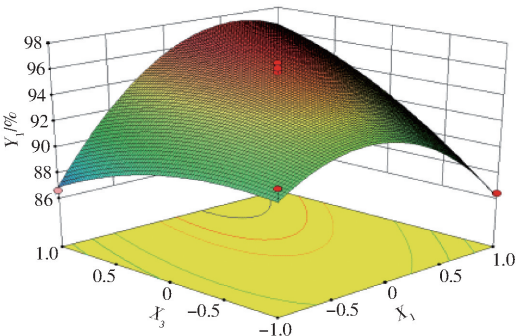


图 10 样机前进速度与二级土薯分离升运装置线速度对明薯率的影响

Fig.10 Impact of forward velocity and two stage soil-potato separating and conveying device velocity on potato obvious rate

由图 10 可以看出, 当二级土薯分离升运装置线速度固定在某一水平, 样机前进速度由 1.10 m/s 递增至 1.80 m/s 时, 挖掘机明薯率呈现出先增大后减小的变化趋势。产生该现象的主要原因是当样机前进速度在一定范围内增大时, 单位时间内挖掘薯块的质量有所增加, 使得明薯率有所上升; 当样机前进速度进一步增大, 挖掘装置输送的膜-土-薯复合体质量上升, 导致二级升运链式输送装置来不及进行土薯分离作业就直接落入液压开启式集薯箱, 因此明薯率又有所下降。

由偏回归分析与等高线密度可以得出, 样机前

进速度与二级土薯分离升运装置线速度交互作用对明薯率的影响显著。

由图 11 可以看出,当样机前进速度固定在某一水平,一级土薯分离装置线速度由 1.15 m/s 递增至 1.85 m/s 时,伤薯率呈现出持续增大的变化趋势。出现该现象的主要原因是当一级土薯分离装置线速度不断升高时,增加了马铃薯薯块在升运链上的滚动次数与碰撞频率,增加了马铃薯表皮被刮擦与损伤的数量,致使伤薯率不断增大。

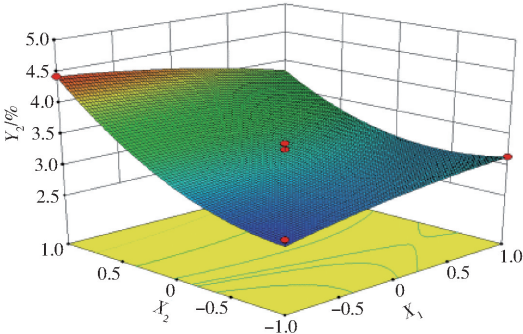


图 11 样机前进速度与一级土薯分离装置线速度对伤薯率的影响

Fig. 11 Impact of forward velocity and one stage soil - potato separating and conveying device velocity on potato injury rate

由响应曲面形状可以看出,挖掘机前进速度与一级土薯分离装置线速度对伤薯率的影响显著,与方差分析结果一致。

由图 12 分析,当一级土薯分离装置线速度固定在某一水平,二级土薯分离升运装置线速度由 0.80 m/s 递增至 1.00 m/s 时,伤薯率呈现出上升的变化趋势。出现该现象的主要原因是当一级土薯分离装置线速度一定时,进入二级土薯分离升运装置的土-薯混合物质量稳定,当二级土薯分离升运装置线速度不断增加时,装置栅杆刮板与输送薯块的刮擦接触频率增加;同时薯块在二级土薯分离升运装置末端的抛出初速度变大,使得落入集薯箱的薯块

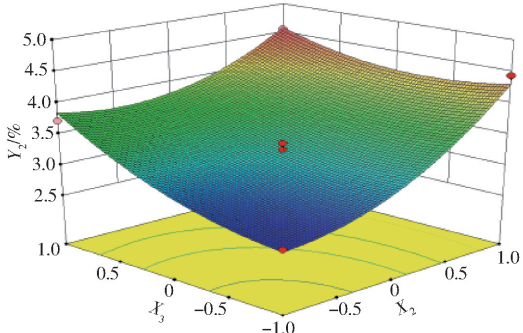


图 12 一级土薯分离装置线速度与二级土薯分离升运装置线速度对伤薯率的影响

Fig. 12 Impact of one stage soil - potato separating and conveying device velocity and two stage soil - potato separating and conveying device velocity on potato injury rate

互作用力增大,伤薯率不断上升。

由响应曲面形状可以看出,一级土薯分离装置线速度与二级土薯分离升运装置线速度对伤薯率的影响较为显著。

4.3 最优工作参数确定与试验验证

应用 Design-Expert 8.0.6 软件中的优化求解器对建立的回归方程模型进行 $\max(Y_1)$ 、 $\min(Y_2)$ 联立目标下的优化求解,得到优化试验指标为明薯率 95.36%、伤薯率 3.01%,最优工作参数组合为:样机前进速 1.50 m/s,一级土薯分离装置线速度 1.37 m/s,二级土薯分离升运装置线速度 0.89 m/s。

为了验证模型的可靠性,应用 4U-1600 型集堆式马铃薯挖掘机按照获得的最优工作参数进行 9 次作业性能试验,试验材料与方法与 3.1 节和 3.2 节所述相同。如表 5 所示,9 次试验下集堆式马铃薯挖掘机的明薯率为 95.11%、伤薯率为 3.36%,表明在优化工作参数条件下能够提升马铃薯在机械化挖掘过程中的收获质量,因此建立的回归模型可靠。

表 5 作业机试验结果

Tab. 5 Test result of working machine	
参数	数值
挖掘深度/mm	0 ~ 300
作业速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	3.0 ~ 5.0
生产率/($\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.35 ~ 0.55
明薯率/%	95.11
伤薯率/%	3.36

5 结论

(1)设计了 4U-1600 型集堆式马铃薯挖掘机,对阶梯挖掘铲、两级升运链式土薯分离输送装置及液压开启式集薯箱等关键作业部件进行设计与选型,并完成其关键参数的计算确定。该机能够较好地提高马铃薯在挖掘过程中的明薯率,减少马铃薯损伤。

(2)为便于样机最优工作参数对应目标函数求解的一致性及其作业性能评价的准确性,分别建立了明薯率、伤薯率与样机前进速度、一级土薯分离装置线速度、二级土薯分离升运装置线速度的二次多项式回归模型。利用 Design-Expert 8.0.6 进行数据优化处理,得到挖掘机最佳工作参数为:样机前进速 1.50 m/s、一级土薯分离装置线速度 1.37 m/s、二级土薯分离升运装置线速度 0.89 m/s。

(3)验证试验表明,4U-1600 型集堆式马铃薯挖掘机作业后,明薯率为 95.11%、伤薯率为 3.36%,性能试验指标均达到国家行业标准明薯率大于等于 95%、伤薯率小于等于 5%的要求,试验结果满足设计要求。

参 考 文 献

- [1] 吕金庆,田忠恩,吴金娥,等. 4U1Z型振动式马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(12):39-47.
LÜ Jinqing, TIAN Zhongen, WU Jin'e, et al. Design and experiment on 4U1Z vibrating potato digger[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 39-47. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 刘崇林,胡军,赵胜雪,等. 马铃薯收获机具研究进展[J]. 中国农机化学报,2019,40(4):31-35,124.
LIU Chonglin, HU Jun, ZHAO Shengxue, et al. Research progress on potato harvesting equipments[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(4): 31-35, 124. (in Chinese)
- [4] 王公仆,蒋金琳,田艳清,等. 马铃薯机械收获技术现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报,2014,35(1):11-15,21.
WANG Gongpu, JIANG Jinlin, TIAN Yanqing, et al. Present status and prospects of mechanical potato harvest technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(1): 11-15, 21. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] KEMPENAAR C, STRUIK P C. The canon of potato science: haulm killing[J]. Potato Research, 2008, 50(3): 341-345.
- [7] 李紫辉,温信宇,吕金庆,等. 马铃薯种植机械化关键技术研究与装备研究进展分析与展望[J/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190301&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.001. (in Chinese)
- [8] 戴飞,杨杰,赵武云,等. 振动式阶梯铲状马铃薯挖掘机作业性能试验[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(3):263-267.
DAI Fei, YANG Jie, ZHAO Wuyun, et al. Experiment on working performance of potato digger with vibrating type of ladder shovel[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(3): 263-267. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 杨然兵,杨红光,尚书旗,等. 拨辊推送式马铃薯收获机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):119-126.
YANG Ranbing, YANG Hongguang, SHANG Shuqi, et al. Design and test of poking roller shoving type potato harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 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. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] 刘宝,张东兴,李晶. MZPH 820型单行马铃薯收获机设计[J]. 农业机械学报,2009,40(5):81-86.
LIU Bao, ZHANG Dongxing, LI Jing. Design on MZPH 820 single-row potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 81-86. (in Chinese)
- [14] 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.
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. 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. (in Chinese)
- [15] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [16] 李彦晶. 4U-1400FD型马铃薯联合收获机挖掘装置的参数优化与结构设计[D]. 兰州:甘肃农业大学,2011.
LI Yanjing. Parameter optimization and structure design of 4U-1400FD potato combine harvester digging device[D]. Lanzhou:Gansu Agricultural University,2011. (in Chinese)
- [17] 史明明,魏宏安,胡忠强,等. 4U-1400型马铃薯联合收获机的设计[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(1):263-267.
SHI Mingming, WEI Hongan, HU Zhongqiang, et al. Design on the 4U-1400 potato combine harvester[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(1): 263-267. (in Chinese)

- [18] 陆祥辉,王昕,张文杰,等. 4U-1400 马铃薯联合收获机分离输送装置的参数分析与试验[J]. 中国农业大学学报, 2015,20(6):269-276.
LU Xianghui, WANG Xin, ZHANG Wenjie, et al. Parameter analysis and experiment for separation conveyor of 4U-1400 type potato harvester[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(6): 269-276. (in Chinese)
- [19] 石林榕,孙伟,赵武云,等. 马铃薯种薯机械排种离散元仿真模型参数确定及验证[J]. 农业工程学报,2018,34(6): 35-42.
SHI Linrong, SUN Wei, ZHAO Wuyun, et al. Parameter determination and validation of discrete element model of seed potato mechanical seeding [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 35-42. (in Chinese)
- [20] NY/T 2464—2013 马铃薯收获机作业质量[S]. 2013.
- [21] 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, 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. 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)
- [22] 陈中玉,关萌,高连兴,等. 两段收获花生螺杆弯齿式轴流摘果装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11): 106-113.
CHEN Zhongyu, GUAN Meng, GAO Lianxing, et al. Design and test on axial flow peanut picking device with screw bending-tooth[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 106-113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161114&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.014. (in Chinese)
- [23] 戴飞,赵武云,马明义,等. 双垄耕作施肥喷药覆膜机工作参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):83-90.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, MA Mingyi, et al. Parameters optimization of operation machine for tillage-fertilization and spraying-filming on double ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 83-90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160112&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.012. (in Chinese)
- [24] 易军鹏,朱文学,马海乐,等. 牡丹籽油超声波辅助提取工艺的响应面法优化[J]. 农业机械学报,2009,40(6):103-110.
YI Junpeng, ZHU Wenxue, MA Haile, et al. Optimization on ultrasonic-assisted extraction technology of oil from *Paeonia suffruticosa* andr. seeds with response surface analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 103-110. (in Chinese)
- [25] 袁雪,祁力钧,王虎,等. 温室摇摆式变量弥雾机喷雾参数响应面法优化[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(4):45-50.
YUAN Xue, QI Lijun, WANG Hu, et al. Spraying parameters optimization of swing, automatic variables and greenhouse mist sprayer with response surface method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(4): 45-50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120410&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.010. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 263 页)

- [18] GIUSTI A, CIRESAN D C, MASCI J, et al. Fast image scanning with deep max-pooling convolutional neural networks[C]//2013 IEEE International Conference on Image Processing. IEEE, 2013: 4034-4038.
- [19] SAINATH T N, VINAYALS O, SENIOR A, et al. Convolutional, long short-term memory, fully connected deep neural networks[C]//2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2015: 4580-4584.
- [20] DANIELSSON P E. Euclidean distance mapping[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1980, 14(3): 227-248.
- [21] ZHANG Z, SABUNCE M. Generalized cross entropy loss for training deep neural networks with noisy labels[C]//Advances in Neural Information Processing Systems, 2018: 8778-8788.
- [22] ZEILER M D. ADADELTA: an adaptive learning rate method[J]. arXiv Preprint arXiv:1212.5701, 2012:1-6.
- [23] BOCK S, GOPPOLD J, WEI M. An improvement of the convergence proof of the ADAM-Optimizer[J]. arXiv Preprint arXiv:1804.10587, 2018:1-5.
- [24] LI M, ZHANG T, CHEN Y, et al. Efficient mini-batch training for stochastic optimization[C]//Proceedings of the 20th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. ACM, 2014: 661-670.
- [25] CHOLLET F. Xception: deep learning with depthwise separable convolutions[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 1251-1258.