

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.018

粘重土壤下马铃薯挖掘机分离输送装置改进设计与试验

吕金庆 孙贺 兑瀚 彭曼曼 于佳钰

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对升运链式马铃薯挖掘机输送分离装置普遍存在的在粘重土壤条件下升运链长度匹配性不佳等问题, 设计了一种适宜粘重土壤的升运链输送分离装置。通过对该输送分离装置及薯土混合物的理论分析, 确定了影响最佳薯土分离效果的主要因素, 得到影响分离性能的升运链长度范围和抖动器等结构参数; 以二级升运链长度、机具前进速度和升运链线速度为试验因素, 以明薯率、伤薯率为试验指标进行田间试验, 试验结果表明: 二级升运链长度为 3.1 m、机具前进速度为 1.2 m/s、升运链线速度为 1.5 m/s 时, 其明薯率为 98.1%, 伤薯率为 1.1%, 高于马铃薯挖掘机的收获作业要求。满足粘重土壤条件下马铃薯挖掘机的作业要求。

关键词: 马铃薯挖掘机; 粘重土壤; 输送分离装置

中图分类号: S225.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)11-0146-10

Design and Experiment on Conveyor Separation Device of Potato Digger under Heavy Soil Condition

LÜ Jinqing SUN He DUI Han PENG Manman YU Jiayu

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Aiming at the problems that the length of lifting chain, jitter separation ability and separation effect of the mixture of potatoes were not matched, the new type of lifting chain device of potato digger under the condition of heavy soil was designed. Based on the theoretical analysis of the separation, deliver and disintegration of the mixture and the mixture of potato and soil on the lifting chain, the main factors influenced the separation effect of the dispersion and crushing were obtained, and the range of lifting chain length and structure parameters of jitter that affected the process of transportation was got. The combination design of orthogonal and quadratic regression equation for the flail was adopted. Taking the length of the second elevator chain, forward speed of machine and velocity of lifting chain as the experimental factors, the field experiment was carried out to test the obvious potato rate and the injured potato rate. The test was implemented in agricultural sciences of academy in Heilongjiang Province at the beginning of September, 2016. The experimental data was processed and optimized by software Design-Expert 8.0.6. The importance of main factors affecting obvious rate was the second elevator chain length and the forward speed of machine. The importance of main factors affecting injury rate was the second elevator chain length, the forward speed of machine and the velocity of the lift chain. Test results showed that when the second elevator chain length was 3.1 m, the forward speed of machine was 1.2 m/s, lifting chain line speed was 1.5 m/s, the obvious potato rate was 98.1%, and the injured potato rate was 1.1%. The function of machine was fully suitable for the potato excavator harvesting requirements. The relationship between the structure and position of jitter on digger, the installation position of the jitter, and the effects of separation and dripped of potato that suited the condition of heavy soil was determined. The research provided an important theoretical support and reference for the improvements and optimization of the lifting chain conveyor separation parts on potato digger.

Key words: potato digger; sticky soil; conveyor separation device

收稿日期: 2017-06-02 修回日期: 2017-09-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701600、2017YFD0700705)、现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-10-P22)、黑龙江省重大科技攻关项目(GA15B401)和北方马铃薯全程机械化科研基地项目

作者简介: 吕金庆(1970—),男,研究员,主要从事马铃薯新型技术及装备研究,E-mail: ljq88886666@163.com

引言

马铃薯收获机械化是马铃薯全程机械化的关键环节,可提高劳动效率、增产增收^[1-3]。目前我国北方粘重土壤条件下收获机械类型较多,但收获机械作业质量差别较大,主要问题表现在升运链长度与粘重土壤相适匹配性差影响升运分离效果;抖动轮的安装位置、振动幅度、振动频率等严重影响薯土混合物抛散筛分,进而影响分离效果^[4-5]。所以研究与粘重土壤相适宜的马铃薯挖掘机升运链式分离装置具有重要意义。

国外发达国家多采用马铃薯联合收获机进行收获作业,具有多种、多级的输送分离装置,薯土分离效果较好,但不适宜北方一季作区的粘重土壤作业和小地块作业。我国马铃薯机械化收获形式主要采用分段收获,升运链式马铃薯挖掘机为应用最普遍的机型,升运链是其关键输送分离装置^[6-7],一般为单级升运链或二级升运链,并通过加装抖动器增加收获过程中的薯土混合物的抛散效果,但目前我国对升运链装置理论研究较少,挖掘机升运链长度与土壤物理特性、抖动轮工作性能等匹配不佳,导致薯土分离效果不佳和机械损伤大等问题,造成马铃薯挖掘机明薯率低等收获质量问题^[8-10]。

针对上述问题,本文设计升运链式马铃薯挖掘机振动抛散、破碎分离输送装置,通过抛送分离、土壤破碎和土壤筛分的理论分析,得出适宜粘重土壤条件下的升运链长度范围和抖动器的结构参数,并通过田间试验确定最佳工作参数组合,有效提高升运链式马铃薯输送分离装置在粘重土壤工况下的薯土分离效果,减少马铃薯机械损伤。

1 结构和工作原理

设计的升运链式马铃薯挖掘机为双行,工作幅宽为 1 650 mm,其结构如图 1 所示。主要包括悬挂架、切土圆盘、挖掘铲、压草轮、升运链式分离装置、地轮、传动系统等。挖掘装置采用浮动的切土圆盘和分体式挖掘铲结构,可有效降低工作阻力和强化挖掘性能。升运链式分离输送装置作为升运链式马铃薯挖掘机的主要核心部件,可对挖掘铲运送上来的薯土混合物进行分离、筛分,其结构参数与运动特性直接关系到薯土分离效果,影响收获质量。

1.1 升运链式分离装置结构

升运链式马铃薯挖掘机输送分离装置结构如图 2 所示,主要由升运链、前导向轮、后驱动轮、抖动器、张紧轮、调节臂等组成。

该分离输送装置采用两级升运链式的结构设

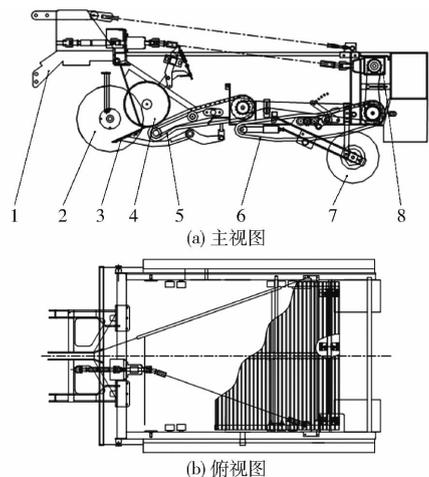


图 1 升运链式马铃薯挖掘机整机结构简图

Fig. 1 Structure sketch of lifting chain potato digger

1. 悬挂架 2. 切土圆盘 3. 挖掘铲 4. 压草轮 5. 第一级升运链 6. 第二级升运链 7. 地轮 8. 传动系统

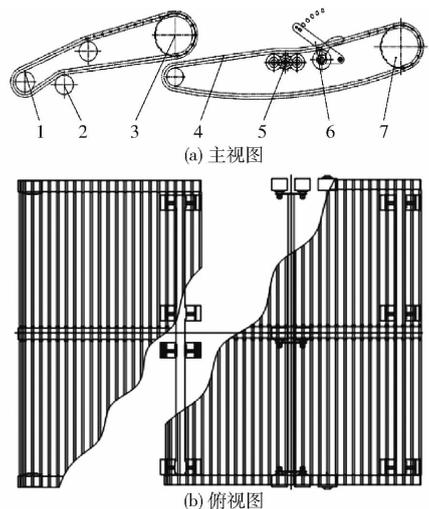


图 2 输送分离装置结构简图

Fig. 2 Structure diagram of conveying and separating device

1. 前导向轮 2. 张紧轮 3. 第一级升运链驱动轮 4. 升运链 5. 抖动器 6. 调节臂 7. 第二级升运链驱动轮

计,为满足其输送和破碎大块土垡能力,设计第一级升运链长度为 2.1 m,安装倾角为 16.5°,工作倾角可根据拖拉机牵引悬挂进行改变。第二级升运链安装有抖动器,为增强其破碎和筛分土壤能力,并由各部件安装位置关系,根据后续理论分析和试验得第二级升运链长度为 3.1 m。

升运链采用带杆式,结构如图 3 所示,具有使用周期长、工作性能稳定、噪声小等优点^[5];升运链杆条直径为 9~11 mm,本文设计杆条直径为 11 mm;中国马铃薯块茎三轴尺寸中最小的厚度尺寸在 30~80 mm 之间^[11],为保证装置有效筛分土壤和薯块,设计杆条间距为 44 mm。

抖动器用于抛散薯土混合物,强化分离性能,增加升运链所移动土壤的破碎率^[12]。根据各工作部

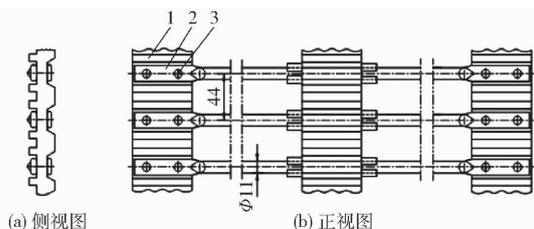


图3 升运链结构图

Fig. 3 Structure diagram of lifting chain

1. 连接输送带 2. 升运链杆条 3. 铆钉

件结构配置和整机传动设计要求,抖动器安装在后驱动轮的张紧边下侧,在第二级升运链前导向轮和后驱动轮中间位置,其结构如图4所示,该抖动器为双滚子式主动型抖动器,独立的滚子可绕自身固定轴转动。本文马铃薯挖掘机作业条件为粘重土壤条件,粘重土壤为土壤质地中粘粒(土壤颗粒粒径小于 0.001 mm)含量在 $30\% \sim 40\%$ ^[13-14],其特点是土壤粘结力、粘着力较大。抖动器的振幅范围为 $15 \sim 60\text{ mm}$ ^[15],为增强破碎、筛分土壤能力,设计抖动器振幅为 60 mm ,后续的理论分析确定抖动器工作频率为 6 Hz 。由于其安装位置和产生固定振幅的要求,设定滚子直径为 80 mm ,其工作圆周半径为 100 mm ,其转过一周可对升运链产生两次往复振动,增强了第二级升运链的抛散破碎能力。

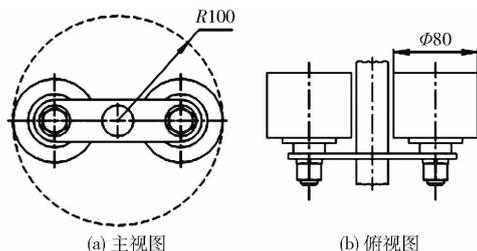


图4 抖动器结构图

Fig. 4 Structure diagram of jitter

1.2 工作原理

挖掘铲挖掘出的土薯混合物,随机具的前进而沿铲面向上运动(如图1所示),进入第一级升运链。土薯混合物随第一级升运链上升,初步筛分土壤、破裂大块土块,当土薯混合物运动到第一级升运链末端,落至第二级升运链上,第二级升运链由于抖动器作用,使升运链向上运动的同时伴随产生一定频率、振幅的振动,对薯土混合物产生输送、分离、破碎和筛分等作用,分离出的薯块最终被输送到机器的末端,散落到地面上铺放成条^[16]。

2 运动特性分析及升运链长度确定

从两方面进行运动分析研究:输送分离装置的运动和薯土混合物的运动。输送分离装置的结构参数直接关系到薯土混合物在升运链上的运动状态,

进而影响收获效果,其中升运链长度和抖动器的工作参数是影响薯土分离效果的主要因素。升运链长度过小,会造成薯土分离效果不佳、明薯率偏低等收获问题;长度过长,会造成伤薯率偏高,且会导致整机结构过长。所以,针对粘重土壤作业条件下升运链长度的研究具有重要意义。

2.1 输送分离装置的运动分析

通过抖动器周期转动带动升运链在垂直链面方向做上下往复振动,升运链的振动为简谐运动。以垂直于链面的方向向上为位移的正方向,升运链抖动时的最低点为位移零点,得位移与时间方程

$$X = \frac{A}{2} \cos(\omega t + \beta) + \frac{A}{2} \quad (1)$$

式中 X ——升运链沿垂直于链面方向的位移, m

A ——升运链随抖动轮振动的振幅, m

ω ——升运链振动的角速度, rad/s

β ——简谐振动的初相位角, $(^\circ)$

位移方程对时间 t 求一阶导数,得速度方程

$$v = -\frac{A}{2} \omega \sin(\omega t + \beta) \quad (2)$$

式中 v ——升运链沿垂直于链面方向的速度, m/s

位移方程对时间求二阶导数,得升运链沿垂直于链面方向的加速度

$$a = -\frac{A}{2} \omega^2 \cos(\omega t + \beta) \quad (3)$$

升运链振动的频率与抖动器产生的频率相同,由频率和角速度之间的关系得

$$\omega = 2\pi f \quad (4)$$

式中 f ——抖动器频率, Hz

将公式(4)代入公式(2)和公式(3)得

$$v = -Af\pi \sin(2\pi ft + \beta) \quad (5)$$

$$a = -2\pi^2 Af^2 \cos(2\pi ft + \beta) \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可得到抖动器作用升运链产生的振幅和频率,对升运链垂直链面方向上速度、加速度的影响关系。

2.2 薯土混合物的运动分析及结构参数确定

进入马铃薯挖掘机分离输送装置的薯土混合物,会经历多次分离、抛散、破碎、筛分等复杂过程^[17]。对薯土混合物在升运链上被抛起过程分析,可确定抖动器结构;土壤与马铃薯分离后,小于杆条间隙的土块随升运链运动被筛下,大于杆条间隙的土块会再经历破碎过程再被筛分,通过对土块破碎和筛分过程的运动学分析,计算出满足土壤被破碎并被筛分的最大升运链长度范围,进而得出与粘重土壤相匹配的升运链长度。

2.2.1 抛送过程分析及抖荡器参数的确定

在第一级升运链上,薯土混合物随升运链的运动向后输送,到达第二级升运链时,由于抖荡器作用,会对薯土混合物产生抛散作用^[11,18]。其抛散程度与抖荡器的作用相关,同时为了保证向后输送的目的,对其进行力学和运动学分析。

当升运链振动达到最大振幅时,薯土混合物将被抛起。对其进行力学分析如图 5 所示,薯土混合物抛离升运链前,受升运链和其他薯土混合物的摩擦力 f_1 ,使其随升运链向后输送,受抖荡器作用,使薯土混合物受到沿垂直于链面向上的惯性力 W_1 和升运链对其支持力 F_N 。建立直角坐标系, X 轴方向为平行于升运链线速度方向, Y 轴为垂直于链面方向,当支持力 F_N 为零,沿 Y 轴建立平衡方程

$$W_1 \geq m_1 g \cos \alpha \quad (7)$$

其中

$$W_1 = -m_1 a$$

式中 m_1 ——薯土混合物质量, kg

α ——升运链工作倾角, ($^\circ$)

g ——重力加速度, m/s^2

将式(6)代入式(7),此时的加速度取最大,得

$$2\pi^2 A f^2 \geq g \cos \alpha \quad (8)$$

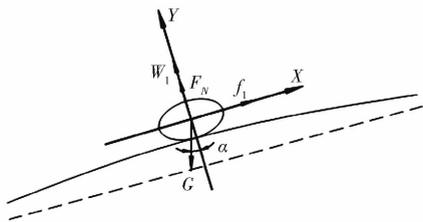


图 5 抛起过程力学分析

Fig. 5 Mechanical analysis of throwing process

对其进行运动学分析,如图 6 所示,建立直角坐标系, X 轴为升运链线速度方向, Y 轴为垂直于链面方向。若实现上行输送条件,薯土混合物在升运链线速度方向分速度之和大于零,得

$$v_0 - v_1 \cos \alpha > 0 \quad (9)$$

式中 v_0 ——升运链运动线速度, m/s

v_1 ——机具前进速度, m/s

薯土混合物脱离升运链被抛起的最大高度为

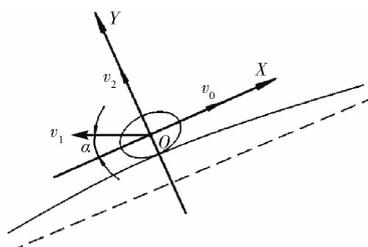


图 6 薯块的抛起输送过程运动学分析

Fig. 6 Kinematic analysis of throwing and conveying process of potato

$$Y_0 = \frac{(v_1 \sin \alpha + v_2)^2}{2g \cos \alpha} \quad (10)$$

式中 v_2 ——分离物在垂直于链面方向的分速度, m/s

由式(5)可知,升运链沿垂直于链面方向的速度在上极限位置时

$$v_2 = \pi A f \quad (11)$$

由文献[19]可知,薯块被抛起高度不应大于 0.3 m,此时对马铃薯机械损伤较小,马铃薯收获机的作业速度为 0.6 ~ 1.8 m/s ,升运链工作倾角为 $18^\circ \sim 34^\circ$ 。由式(8)、(10)、(11)计算得

$$A f \leq 0.38 \text{ m/s} \quad (12)$$

从上述分析可知:抖荡器的振幅和频率影响着薯土混合物在升运链被抛起高度,当振幅、频率满足一定关系时,能够增强薯土混合物的抛散作用,且减少伤薯。

根据马铃薯收获机分离装置设计要求,抖荡器的频率范围为 3 ~ 8 Hz。收获期的马铃薯地块含水率小于 25%^[20],其粘着力较大,土壤多会粘结薯块,进而对抛起后薯块撞击杆条时有一定保护作用。振幅和频率过小,会造成薯土分离效果不佳;过大,会造成伤薯率偏高,还会影响升运链的输送能力。根据式(12)并综合前期研究,确定抖荡器工作振幅 $A = 60 \text{ mm}$,频率 $f = 6 \text{ Hz}$ 。

抖荡器的类型可分为主动型和从动型两种。从动型抖荡器随着升运链进行运动,并进行振动,受升运链线速度限制,其无法直接改变自身频率大小;主动型抖荡器可以自由调节自身转速,从而改变升运链的振动频率。本文设计的抖荡器为主动型,设其转速为 n ,则抖荡器产生的频率计算公式为

$$f = \frac{Zn}{60} \quad (13)$$

式中 Z ——抖荡器凸顶数,个

抖荡器的转速与拖拉机动力输出轴转速、减速器减速比相关,计算可得凸顶数 $Z = 2$,满足升运链可抛送薯土混合物要求。

2.2.2 碎土过程分析及破碎段升运链长度确定

在第二级升运链,受抖荡器振动作用,主要发生土块被破碎的过程,也包括薯块、土壤和根须的三者分离。此过程会发生薯土混合物与抖荡链共振,当混合物抛起后下落时,又与升运链杆条相碰撞,使其分离,使土块破裂或破碎^[21]。

将土块理想化为一个球体,对整个破碎过程进行分析。实际的杆条与土块撞击,瞬时的惯性力远大于升运链自身振动对土块产生的惯性力。设垂直于工作链面的加速度 a 为土块的加速度。如图 7 所

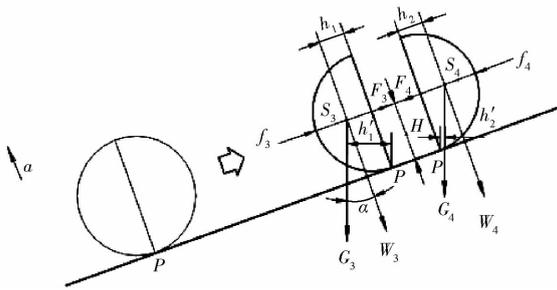


图7 土块破碎过程的分析

Fig. 7 Analysis of crushing process

示,对 P 点列力矩方程,若保证土块被正常破碎,需保证其所受破碎力矩大于其内力的吸附力矩,得

$$\begin{cases} G_3 h'_1 + W_3 h_1 > f_3 H + F_3 H \\ G_4 h'_2 + W_4 h_2 > f_4 H + F_4 H \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} W_3 = -m_3 a \\ W_4 = -m_4 a \end{cases} \quad (15)$$

其中 W_3, W_4 ——两半球体所受惯性力, N

F_3, F_4 ——土块粘结力, N

f_3, f_4 ——土块所受周围物体的作用力, N

h_1, h_2 ——质心与土块断裂面的垂直距离, mm

m_3, m_4 ——半球体质量, kg

h'_1, h'_2 —— P 点与重力 G_3, G_4 的垂直距离, mm

G_3, G_4 ——土块两分离体 S_3, S_4 的重力, N

H ——土块质心与升运链链面垂直距离, mm

将式(3)、(15)代入式(14)得

$$\begin{cases} 2\pi^2 m_3 A f^2 \cos(2\pi ft + \beta) h_1 + m_3 g h'_1 > f_3 H + F_3 H \\ 2\pi^2 m_4 A f^2 \cos(2\pi ft + \beta) h_2 + m_4 g h'_2 > f_4 H + F_4 H \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} mgh' + 2\pi^2 m A f^2 \cos(2\pi ft + \beta) h = M_0 \\ mgh' = B \\ 2\pi^2 m h = K \end{cases} \quad (17)$$

得破碎力矩方程

$$M_0 = K A f^2 \cos(2\pi ft + \beta) + B \quad (18)$$

由式(18)可知,分离输送装置的破碎能力与抖动器产生的振幅 A 和频率 f 的平方成正比。

忽略破碎过程其他物体对薯土混合物的作用力,得到土壤破碎所需的破碎力矩和升运链对土壤产生的破碎力矩为

$$\begin{cases} 2\pi^2 m_3 A f^2 \cos(2\pi ft + \beta) h_1 + m_3 g h'_1 > F_3 H \\ 2\pi^2 m_4 A f^2 \cos(2\pi ft + \beta) h_2 + m_4 g h'_2 > F_4 H \end{cases} \quad (19)$$

设球体土块的半径为 R ,根据几何关系可知

$$\begin{cases} h_1 = h_2 = \frac{3}{8}R \\ H = R \\ h'_1 = \left(\frac{3}{8} \cos \alpha + \sin \alpha \right) R \\ h'_2 = \left(\sin \alpha - \frac{3}{8} \cos \alpha \right) R \end{cases} \quad (20)$$

土壤的破碎难易程度与土壤强度成正比,粘结力是产生土壤强度的主要原因,土壤的粘结力计算式为

$$F = cS \quad (21)$$

式中 S ——土壤断裂面的面积, cm^2

c ——土壤粘结强度, kPa

土壤的质量

$$m = \gamma V \quad (22)$$

式中 γ ——土壤容重, g/cm^3

V ——土壤容积, cm^3

将式(20)~(22)代入式(19),加速度函数取最大值时,升运链产生最大破碎力矩。

$$\begin{cases} \frac{4}{3} \pi R^3 \left(\frac{3}{8} \cos \alpha + \sin \alpha \right) R + \\ 2\pi^2 \gamma \frac{1}{2} \frac{4}{3} \pi R^3 A f^2 \frac{3}{8} R > \pi R^2 c R \\ \frac{4}{3} \pi R^3 \left(\sin \alpha - \frac{3}{8} \cos \alpha \right) R + \\ 2\pi^2 \gamma \frac{1}{2} \frac{4}{3} \pi R^3 A f^2 \frac{3}{8} R > \pi R^2 c R \end{cases} \quad (23)$$

式中 $\frac{4}{3} \pi R^4 \left(\frac{3}{8} \cos \alpha + \sin \alpha \right)$ 在数值上很小可忽略,

$\frac{4}{3} \pi R^4 \left(\sin \alpha - \frac{3}{8} \cos \alpha \right)$ 在数值上也很小可忽略。

化简公式,从式(23)可看出,土块撞击杆条所受惯性力矩为破碎土块的最主要的力矩。破碎过程中,土块会沿惯性力矩方向和土块粘结力方向发生微小位移,惯性力矩和土块内部粘结力矩在其方向上做功,在数值上,将惯性力矩和土块内部粘结力矩视为升运链产生破碎能和土块破碎所需能量^[22],则

$$\gamma A f^2 \pi^3 R^4 = E_i \quad (24)$$

$$\pi R^3 c = E \quad (25)$$

式(24)为升运链对土块产生一次破碎冲击的能量,式(25)为土块彻底破碎所需要的总能量。

土块彻底破碎所需要的比冲击破碎能为^[23-24]

$$e = \frac{E}{m} \quad (26)$$

升运链对土块产生一次比冲击破碎能

$$e_i = \frac{E_i}{m} \quad (27)$$

升运链可破碎土块的冲击次数为

$$n_i = \frac{e}{e_i} \quad (28)$$

一般旱作土壤耕作层容重为 $1.0 \sim 1.3 \text{ g}/\text{cm}^3$,收获期马铃薯地块的土壤容重较大,取土壤容重 $\gamma = 1.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。北方作业区粘黑钙土收获期土壤含

水率为 15% ~ 24%，土壤的平均粘结强度 c 为 10 ~ 12 kPa，计算取最大粘结强度为 $c = 12$ kPa。

本文设计升运链杆条间隙为 33 mm，若被破碎后，可筛下的土块半径 $R < 16.5$ mm，取破碎前土块半径 $R = 33$ mm。代数计算，得 $n_i = 13.12$ ，取整数 $n_i = 14$ ，即经过升运链对土块振动冲击 14 次达到土块被破碎所需破碎能，升运链产生加速度满足简谐振动，一个周期内产生两次冲击最大值，方向相反，即升运链简谐运动经过 $n_i/2$ 个周期，土块破碎。则土块破碎过程所经过的长度为

$$S_1 = \frac{n_i}{2} T v_0 \quad (29)$$

式中 T ——升运链简谐运动的周期，s

马铃薯收获机升运链的线速度一般在 1.0 ~ 1.6 m/s 为宜^[17,25]。计算得土块破碎过程所经过的长度 S_1 在 1.17 ~ 1.87 m 范围内，即需要升运链长度 L_1 为 1.17 ~ 1.87 m。

2.2.3 筛分过程分析及筛分段升运链长度确定

被破碎后土块的直径小于升运链的杆条间隙时，随升运链振动向后输送时，由于惯性力的作用沿杆条间隙被筛下。土块筛分的主要形式是土块从杆条间隙中漏过。将土块理想化为球状散粒体，建立土壤筛分过程的运动模型，如图 8 所示，土球完成在升运链杆条间筛分所走过的沿垂直链面方向的位移为 h_s ，由位移与时间关系可知

$$\begin{cases} a_0 = g \cos \alpha \\ h_s = v_s t_0 - \frac{1}{2} a_0 t_0^2 \\ h_s = d_0 + d \end{cases} \quad (30)$$

式中 a_0 ——重力加速度沿垂直链面方向分量， m/s^2

v_s ——垂直于链面方向的速度， m/s

d_0 ——被筛分的土球直径， mm

d ——杆条直径， mm

t_0 ——土球被筛下所用时间， s

升运链抖动使土球具有沿垂直于升运链链面的

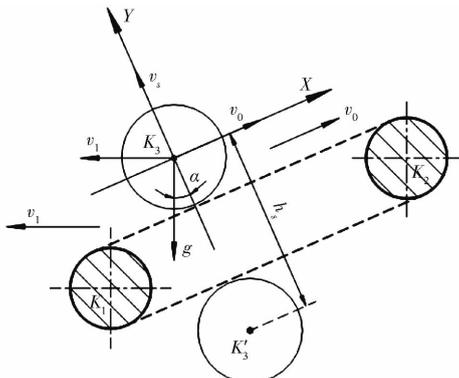


图 8 土球筛分过程分析

Fig. 8 Analysis of screening of soils

方向速度 v_s ，即

$$v_s = -A f \pi \sin(2 \pi f t + \beta) \quad (31)$$

当 v_s 沿垂直于链面方向向上时，数值最大，即

$$v_{s \max} = A f \pi \quad (32)$$

可被筛分的土球直径最大为 33 mm 时，位移 h_s 最大，土球被筛分所经历时间最长。计算得土球被筛分经历最长时间为 0.17 s。即被破碎后小于杆条间隙的土块完成筛分过程需要 0.17 s，此时土球沿升运链线速度方向运动的位移为

$$S_2 = v_0 t \quad (33)$$

即直径小于杆条间隙的土球筛分过程所需要的升运链长度 $L_2 = S_2$ ，计算得 L_2 为 0.17 ~ 0.27 m。

根据土块被破碎和筛分过程的分析，可计算出完成土块破碎和分离需要的升运链长度 $L_1 + L_2$ 为 1.34 ~ 2.14 m，则计算出在粘重土壤条件下，提高薯、土分离能力的马铃薯挖掘机升运链长度为 2.7 ~ 4.3 m。

3 田间试验

3.1 试验条件

2016 年 9 月末在黑龙江省农业科学院试验基地（作业面积 4 hm^2 、黑粘土）、黑龙江省克山（作业面积 3 hm^2 、黑粘土）进行了田间收获试验。试验地为旱地垄播，试验区的垄长大于 500 m，垄距为 800 mm，垄高 280 mm，土壤含水率为 18.8%。品种为：大西洋、克新 19，垄播株距约为 200 mm，结薯深度为 150 ~ 300 mm。马铃薯挖掘机配套动力为泰山 1004 型拖拉机，功率为 88.4 kW，田间作业情况如图 9 所示。



(a) 田间试验

(b) 收获效果

图 9 收获试验

Fig. 9 Harvest experiment

3.2 试验方法及试验目的

根据国家行业标准《NY/T 648—2002 马铃薯收获机质量评价技术规范》规定的试验方法，在垄播旱地类型马铃薯种植田地进行收获试验。为测定升运链式马铃薯挖掘机输送分离装置在粘重土壤条件下的分离输送性能，考虑影响其土薯分离效果的主要因素^[26]，以升运链长度、机具前进速度、升运链线速度为试验因素；以明薯率和伤薯率作为本试验评

价指标,进行二次正交旋转组合试验。收获试验后,随机取两行长度为10 m的试验区域进行数据采集测量,每组试验重复3次。

3.3 试验方案与结果分析

3.3.1 试验方案及结果

采用二次正交旋转组合试验设计安排试验,以明薯率和伤薯率为试验指标,各试验因素水平范围为:机具的前进速度为0.6~1.8 m/s、升运链的线速度为0.8~2.4 m/s,根据理论分析部分所得基础数据,选定升运链的长度为2.5~4.5 m。通过试验结果分析,得到影响试验指标的3个因素的显著性,并进行分析,根据实际需求对各参数组合进行优化,最终获得较合适的各因素水平组合。试验因素水平编码如表1所示,试验方案与试验结果如表2所示。

表1 试验因素编码

Tab.1 Experimental factors and levels

编码	试验因素		
	二级升运链	机具前进速度	升运链线速度
	长度 x_1/m	$x_2/(m \cdot s^{-1})$	$x_3/(m \cdot s^{-1})$
$\gamma(1.682)$	4.50	1.80	2.40
1	4.09	1.56	2.08
0	3.50	1.20	1.60
-1	2.91	0.84	1.12
$-\gamma(-1.682)$	2.50	0.60	0.80
Δ_i	0.59	0.36	0.48

3.3.2 试验结果分析

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,得到明薯率 Y_1 和伤薯率 Y_2 的回归方程,并进行显著性检验。

(1) 明薯率 Y_1

通过对试验数据的分析和拟合,明薯率 Y_1 方差分析如表3所示。可知,对于试验指标明薯率 Y_1 , x_1 、 x_3^2 、 x_2 对明薯率 Y_1 的影响极显著 ($P < 0.01$); x_3 、 x_2^2 和 x_1x_2 对明薯率 Y_1 的影响显著 ($0.01 < P < 0.05$); x_1x_3 对明薯率 Y_1 的影响较显著 ($0.05 < P < 0.10$)。将不显著的交互作用项的回归平方及自由度并入残差项,再次进行方差分析,结果如表3所示。得到各因素对明薯率 Y_1 影响的回归方程

$$Y_1 = 86.66955 + 0.80868x_1 - 2.14823x_2 + 13.62142x_3 + 1.47314x_1x_2 - 0.92808x_1x_3 - 1.72786x_2^2 - 3.39379x_3^2 \quad (34)$$

对上述回归方程进行失拟性检验,结果如表3所示,试验指标和试验因素存在显著的二次关系,分析结果合理。

表2 试验方案与试验结果

Tab.2 Test plan and experimental data

序号	试验因素			明薯率 $Y_1/\%$	伤薯率 $Y_2/\%$
	x_1/m	$x_2/(m \cdot s^{-1})$	$x_3/(m \cdot s^{-1})$		
1	2.91	0.84	1.12	97.9	1.0
2	4.09	0.84	1.12	99.1	1.7
3	2.91	1.56	1.12	96.1	0.6
4	4.09	1.56	1.12	98.7	1.2
5	2.91	0.84	2.08	97.3	1.0
6	4.09	0.84	2.08	97.6	1.5
7	2.91	1.56	2.08	96.0	0.9
8	4.09	1.56	2.08	97.4	1.4
9	2.50	1.20	1.60	97.7	0.8
10	4.50	1.20	1.60	99.7	1.7
11	3.50	0.60	1.60	98.5	1.4
12	3.50	1.80	1.60	97.4	1.2
13	3.50	1.20	0.80	96.3	0.9
14	3.50	1.20	2.40	96.5	1.2
15	3.50	1.20	1.60	98.5	1.2
16	3.50	1.20	1.60	98.3	1.1
17	3.50	1.20	1.60	98.6	1.2
18	3.50	1.20	1.60	98.8	1.3
19	3.50	1.20	1.60	99.0	1.3
20	3.50	1.20	1.60	98.2	1.2
21	3.50	1.20	1.60	98.6	1.2
22	3.50	1.20	1.60	98.1	1.2
23	3.50	1.20	1.60	98.4	1.1

(2) 伤薯率 Y_2

通过对试验数据的分析和多元回归拟合,试验指标伤薯率 Y_2 方差分析表如表4所示。由表4可知, x_1 、 x_2 、 x_3 对伤薯率 Y_2 的影响极显著 ($P < 0.01$); x_1^2 、 x_3^2 对伤薯率 Y_2 的影响较显著 ($0.01 < P < 0.05$); x_1x_2 对伤薯率 Y_2 的影响显著 ($0.05 < P < 0.1$)。将不显著的交互作用项的回归平方和及自由度并入残差项,而后再进行方差分析,结果如表4所示。得到各因素对伤薯率 Y_2 影响的回归方程

$$Y_2 = -0.12007 - 0.45524x_1 + 0.92864x_2 + 1.00094x_3 - 0.35355x_1x_2 + 0.18802x_1^2 - 0.25310x_3^2 \quad (35)$$

对上述回归方程进行失拟性检验,结果如表4所示,验证分析结果合理。

3.3.3 响应曲面分析

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对数据的处理,得出二级升运链长度 x_1 、机具前进速度 x_2 、升运链线速度 x_3 之间的显著和较显著交互作用对明薯率 Y_1 、伤薯率 Y_2 两个试验指标影响的响应曲面,如图10所示。

如图10a所示,当二级升运链长度一定时,明薯率 Y_1 整体上随机具前进速度的增加呈先增加后减

表 3 明薯率 Y_1 方差分析

Tab.3 Variance analysis for obvious rate

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	20.27/20.18	9/7	2.25/2.88	18.01/25.13	<0.000 1*** / <0.000 1***
x_1	5.75/5.75	1/1	5.75/5.75	45.99/50.16	<0.000 1*** / <0.000 1***
x_2	2.26	1/1	2.26/2.26	18.03/19.67	0.001 0*** / 0.000 5***
x_3	0.73	1/1	0.73/0.73	5.86/6.39	0.030 9** / 0.023 2**
x_1x_2	0.78/0.78	1/1	0.78/0.78	6.25/6.81	0.026 6** / 0.019 7**
x_1x_3	0.55/0.55	1/1	0.55/0.55	4.41/4.81	0.059 9* / 0.044 5**
x_2x_3	0.061	1	0.061	0.49	0.496 4
x_1^2	0.033	1	0.033	0.26	0.616 2
x_2^2	0.77/0.77	1/1	0.77/0.77	6.13/6.70	0.027 9** / 0.020 6**
x_3^2	9.36/9.37	1/1	9.36/9.37	74.85/81.71	0.000 1*** / <0.000 1***
残差	1.63/1.06	13/15	0.13/0.11		
失拟差	0.97/0.66	5/7	0.19/0.15	2.34/1.84	0.136 4/0.206 4
总和	21.90/21.90	22/22			

注：“/”后面数字为剔除不显著因素后明薯率 Y_1 方差分析结果。***表示极显著 ($P < 0.01$)；**表示显著 ($0.01 < P < 0.05$)；*表示较显著 ($0.05 < P < 0.10$)。下同。

表 4 伤薯率 Y_2 方差分析

Tab.4 Variance analysis for injury rate

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1.39/1.37	9/6	0.15/0.23	10.55/23.98	<0.000 1*** / <0.000 1***
x_1	0.92/0.92	1/1	0.92/0.92	92.67/96.86	<0.000 1*** / <0.000 1***
x_2	0.17/0.17	1/1	0.17/0.17	16.69/17.44	0.001 3*** / 0.000 7***
x_3	0.11/0.11	1/1	0.11/0.11	11.35/11.87	0.005 0*** / 0.003 3***
x_1x_2	0.045/0.045	1/1	0.045/0.045	4.53/4.74	0.053 0* / 0.044 9**
x_1x_3	-2.220×10^{-16}	1	-2.220×10^{-16}	-2.235×10^{-14}	1.000 0
x_2x_3	0.020	1	0.020	2.01	0.179 4
x_1^2	0.070/0.070	1/1	0.070/0.070	7.09/7.39	0.019 5** / 0.015 2**
x_2^2	2.911×10^{-3}	1	2.911×10^{-3}	0.29	0.597 4
x_3^2	0.052/0.052	1/1	0.052/0.052	5.23/5.48	0.039 6** / 0.032 4**
残差	0.13/0.15	13/16	9.933×10^{-3} / 9.502×10^{-3}		
失拟差	0.069/0.092	5/8	0.014/0.012	1.84/1.53	0.210 6/0.279 5
总和	1.52/1.52	22/22			

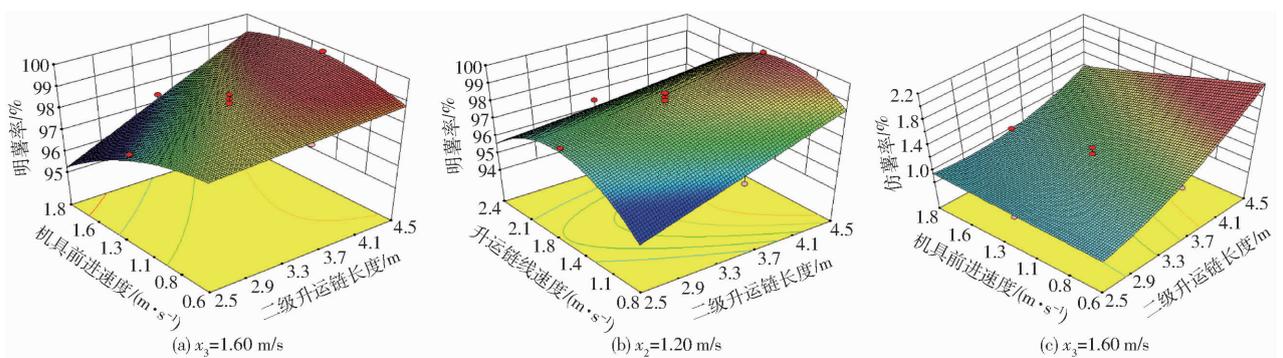


图 10 明薯率和伤薯率的双因素响应曲面

Fig. 10 Response surfaces of double parameters about obvious rate and injury rate

小趋势,最优的机具前进速度范围为 0.8 ~ 1.6 m;当机具前进速度一定时,明薯率 Y_1 整体上与二级升运链长度成正相关,最佳的升运链长度范围为 3.7 ~ 4.5 m,其中,二级升运链长度是影响明薯率的主要试验因素。

如图 10b 所示,二级升运链长度一定时,明薯率 Y_1 随着升运链线速度的增加呈先增加后减小趋势,最优的升运链线速度范围为 1.1 ~ 1.8 m;当升运链线速度一定时,明薯率 Y_1 与二级升运链长度成正相关,最优的二级升运链长度在 4.1 ~ 4.5 m 范围内,

其中,二级升运链长度是影响明薯率的主要试验因素。

如图 10c 所示,当二级升运链长度一定时,伤薯率 Y_2 整体上随着机具前进速度的增加而减小,最佳的机具前进速度范围为 1.1 ~ 1.8 m/s;当机具前进速度一定时,伤薯率 Y_2 随二级升运链长度的增大而逐渐增大,最佳的二级升运链长度范围为 2.5 ~ 3.7 m,其中,影响伤薯率 Y_2 的主要试验因素是二级升运链长度。

3.3.4 参数优化与验证

通过对图 10 中 3 个响应曲面的分析,为得到最佳的试验因素水平组合,利用 Design-Expert 8.0.6 软件中的优化模块对 3 个回归模型进行求解,根据马铃薯挖掘机收获作业的实际工作条件、作业性能要求及上述相关模型分析结果,选择优化约束条件^[27]为

$$\begin{cases} \max Y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \min Y_2(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 2.5 \text{ m} \leq x_1 \leq 4.5 \text{ m} \\ 1.1 \text{ m/s} \leq x_2 \leq 1.6 \text{ m/s} \\ 1.1 \text{ m/s} \leq x_3 \leq 1.8 \text{ m/s} \end{cases} \end{cases} \quad (36)$$

通过优化求解,得到二级升运链长度范围为 3.1 ~ 4.1 m,机具前进速度为 1.0 ~ 1.6 m/s,升运链线速度为 1.3 ~ 1.6 m/s 时,分离装置输送分离性能最好,明薯率为 98.1% ~ 98.7%,伤薯率为 0.9% ~ 1.2%。

3.4 验证试验

验证试验的试验条件、试验测试方法与正交试验相同,比较经过改进设计和优化调节后的明薯率和伤薯率与标准指标值之间的差异,进而验证该升运链式马铃薯分离输送装置的分离输送性能。

考虑到加工和实际的作业要求,升运链式分离

输送装置结构参数和作业参数选择为:二级升运链长度为 3.1 m、机具前进速度为 1.2 m/s、升运链线速度为 1.5 m/s,相对应优化的试验指标明薯率为 98.1%、伤薯率为 1.1%。将上述因素水平进行验证试验,其中测量结果为 3 次测量的平均值,与相关评价标准进行结果对比^[28]。

验证试验结果表明,本设计的升运链式分离输送装置其明薯率为 98.3%、伤薯率为 1.0%,与优化所得结果基本一致,且均明显优于相关标准。其明薯率较高,是由于升运链长度足够长,能够将马铃薯与土壤分离,大部分土块被筛分,减少了马铃薯被输送后方时的土壤量,且机具前进速度和升运链线速度等工作参数合理,分离效果提升,明薯率提高;伤薯率较低,主要是由于升运链长度设计合理,在满足筛分前提下,尽量减少马铃薯与杆条直接接触的升运链行程范围,减少碰撞,降低了伤薯率。验证试验表明相关优化组合合理,按优化参数调节后的升运链式分离装置提高粘重土壤条件下的薯土分离效果,满足作业要求。

4 结论

(1)设计的升运链式分离输送装置,能够满足粘重土壤条件下的马铃薯收获作业。升运链长度和抖动器结构的设计,增加了对薯土混合物抛散、分离的作用,提高了破碎、筛分土壤能力,提升了马铃薯挖掘机作业效率。

(2)进行田间试验,建立试验指标与影响因素的回归模型,并进行优化求解,试验结果表明:当二级升运链长度为 3.1 m、机具前进速度为 1.2 m/s、升运链线速度为 1.5 m/s 时,相对应的试验指标明薯率为 98.1%、伤薯率为 1.1%,各项指标均优于国家行业标准。

参 考 文 献

- 1 KEMPENAAR C, STRUIK P C. The canon of potato science: haulm killing[J]. Potato Research, 2008, 50(3): 341 - 345.
- 2 吕金庆,尚琴琴,杨颖,等. 马铃薯杀秧机设计优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 106 - 114, 98. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160515&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.015.
LÜ Jinqing, SHANG Qinqin, YANG Ying, et al. Design optimization and experiment on potato haulm cutter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 106 - 114, 98. (in Chinese)
- 3 吕金庆,田忠恩,杨颖,等. 马铃薯机械发展现状、存在问题及发展趋势[J]. 农机化研究, 2015, 37(12): 258 - 263.
LÜ Jinqing, TIAN Zhongen, YANG Ying, et al. The development situation existing problems and development trend of potato machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(12): 258 - 263. (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.
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. (in Chinese)
- 5 胡志超,彭宝良,谢焕雄,等. 升运链式花生收获机的设计与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(11): 220 - 222.
- 6 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)

- 7 PLATT H W, CAMPBELL A J, BIRT I, et al. Modifications of a potato harvester for small plot field research[J]. American Potato Journal, 1990, 67: 799 - 803.
- 8 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)
- 9 陈中玉,高连兴,CHEN Charles,等. 中美花生收获机械化技术现状与发展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 1 - 21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170401&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.001.
CHEN Zhongyu, GAO Lianxing, CHEN Charles, et al. Analysis on technology status and development of peanut harvest mechanization of China and the United States[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 1 - 21. (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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160717&flag=1. 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)
- 11 王彦军. 4M-2 型马铃薯联合收获机分离输送系统的研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2007.
WANG Yanjun. Research on separating and conveying system of the 4M-2 potato combine harvester[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 12 张兆国,王法安,张永成,等. 自走式三七收获机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 234 - 240. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s036&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.036.
ZHANG Zhaoguo, WANG Faan, ZHANG Yongcheng, et al. Design and experiment of self-propelled panax notoginseng harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 234 - 240. (in Chinese)
- 13 孙一源,高行方,余登苑. 农业土壤力学[M]. 1 版. 北京:农业出版社, 1985.
- 14 姚贤良,程云生. 土壤物理学[M]. 1 版. 北京:农业出版社, 1986.
- 15 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 1 版. 北京:机械工业出版社, 1988.
- 16 孙广辉,魏宏安,李彦晶,等. 4UFD-1400 型马铃薯联合收获机薯秧分离装置设计[J]. 甘肃农业大学学报, 2012, 47(6): 146 - 150.
SUN Guanghui, WEI Hongan, LI Yanjing, et al. Development of potato seedling separation devices of 4UFD-1400 potato combine harvester[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2012, 47(6): 146 - 150. (in Chinese)
- 17 徐光第. 马铃薯收获机的抖动减理论基础[J]. 山西农业科学, 1963(1): 17 - 23.
- 18 MCRAE D C, HUTCHISON P S, CARRUTHERS J. Sieving control and horizontal agitation of potato harvester chains[J]. Transactions of the ASAE, 1986, 29(2): 366 - 369, 373.
- 19 桑永英,张东兴,张梅梅. 马铃薯碰撞损伤试验研究及有限元分析[J]. 中国农业大学学报, 2008, 13(1): 81 - 84.
SANG Yongying, ZHANG Dongxing, ZHANG Meimei. Study on bruising damage experiment of potato and finite element analysis[J]. Journal of China Agricultural University, 2008, 13(1): 81 - 84. (in Chinese)
- 20 田忠恩. 马铃薯挖掘机防堵装置系统的设计与性能试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2016.
TIAN Zhongen. Design and experiment research on anti-blocking system of potato digger[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 21 武涛,马旭,齐龙,等. 玉米根茬根土分离装置[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 133 - 139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140621&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.021.
WU Tao, MA Xu, QI Long, et al. Roots-soil separating device of corn stubble[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 133 - 139. (in Chinese)
- 22 孟凤英. 粘性土壤破碎机理及分形规律研究[D]. 南京:南京农业大学, 2009.
MENG Fengying. A study on the fragmentation mechanism of cohesive soil and its fractal characteristics[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- 23 孟凤英,丁启朔,鹿飞,等. 冲击作用下粘性土壤破碎体的分形维数与影响因素[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 108 - 111, 124.
MENG Fengying, DING Qishuo, LU Fei, et al. Fragmentation fractal dimensions of cohesive soil under impact and its influencing factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 108 - 111, 124. (in Chinese)
- 24 丁启朔,丁为民,孟为国,等. 耕作力学研究中的土壤结构表现与评价[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 62 - 66.
DING Qishuo, DING Weimin, MENG Weiguo, et al. Characteristics and quantifications of soil structure for soil tillage research[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 62 - 66. (in Chinese)
- 25 Cz. 卡那沃依斯基. 收获机械[M]. 曹崇文,吴春江,柯保康,译. 北京:中国农业机械出版社, 1983.
- 26 康憬,李涛,孙伟,等. 马铃薯挖掘机输送分离部件参数优化与试验分析[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(6): 258 - 260.
KANG Jing, LI Tao, SUN Wei, et al. Parameters optimization and test analysis of delivery separate parts in potato differ[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(6): 258 - 260. (in Chinese)
- 27 葛宜元,梁秋艳,王桂莲. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2015.
- 28 何为,薛卫东,唐斌. 优化试验设计方法与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社, 2012.