doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.S1.020

甜菜联合收获机分离输送装置设计与试验

杨善东[1]　邱田元[1]　马　闯[1]　李学强[2]　王琳琳[2]　刘　洋[2]
(1.山东理工大学农业工程与食品科学学院,淄博 255000;2.山东思代尔农业装备有限公司,德州 253600)

摘要:为解决甜菜联合收获机分离输送过程中甜菜块根含杂率高、损伤率高的问题,设计了一种六行甜菜联合收获机的三级分离输送装置,阐述了该装置的主要结构及工作原理,并确定关键参数。通过对分离输送过程中土壤、甜菜的运动学分析及甜菜在碰撞过程中的能量分析,确定了影响甜菜含杂和损伤效果的主要因素及各因素的试验取值范围。以拨送板转速、杆条式链筛输送速度和橡胶尾筛倾角为试验因素,以含杂率和损伤率为试验指标,进行二次回归正交旋转组合试验,利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行分析,得到试验因素与各指标的回归方程。通过响应面分析各因素对评价指标的影响规律,得出优化参数组合为:拨送板转速 100.0 r/min、杆条式链筛输送速度 1.4 m/s 和橡胶尾筛倾角 39.0°。验证试验结果表明,经过三级分离输送后甜菜含杂率为 3.4%,损伤率为 2.6%,各项指标均符合国家行业标准要求。

关键词:甜菜联合收获机;分离输送装置;设计
中图分类号:S225.7+2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)S1-0191-10

Design and Test of Sugar Beet Combine Harvester Separation and Conveying Device

YANG Shandong[1]　QIU Tianyuan[1]　MA Chuang[1]　LI Xueqiang[2]　WANG Linlin[2]　LIU Yang[2]
(1. *School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo* 255000, *China*
2. *Shandong Star Agricultural Equipment Co., Ltd., Dezhou* 253600, *China*)

Abstract: In order to solve the problems of high impurity rate and high damage rate of sugar beet root in the complicated separation and conveying process of sugar beet combined harvester, a six-row sugar beet combined harvester with three-stage separation and conveying device was designed. The main structure and working principle of the device were described, and the key parameters were determined. Through the kinematic analysis of soil and sugar beet in the separation and transportation process and energy analysis of sugar beet in the collision process, the main factors affecting the impurity rate and damage rate of sugar beet were determined. The rotation speed of the dial plate, the line speed of the rod-type chain screen and the inclination angle of the rubber tail screen were taken as the test factors, and the hybrid rate and the damage rate were taken as the test indexes. The quadratic regression orthogonal rotation combination test was carried out, and the results were analyzed by using Design-Expert 8.0.6 software, and the regression equation of the test factors and each index was obtained. The influence of each factor on the evaluation index was analyzed intuitively by response surface. The optimized parameters were obtained as follows: the rotation speed of the dial plate was 100.0 r/min, the linear speed of the rod-type chain screen was 1.4 m/s and the inclination angle of the rubber tail screen was 39.0°. The verification test was carried out. The results showed that the rate of breakage was 3.4% and the damage rate was 2.6%.

Key words: sugar beet combine harvester; separation conveying device; design

0　引言

甜菜作为制糖重要原材料之一,其种植区域广泛分布在中国北方地区如内蒙古、新疆、河北、东北地区等[1-2]。甜菜收获过程包括打秧、挖掘、清选、输送、装车等多重工序,在我国北方地区大多采用人

收稿日期:2023-06-10　修回日期:2023-08-30
基金项目: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)
作者简介:杨善东(1975—),男,副教授,博士生,主要从事农业装备及其自动化研究,E-mail:ysd@sdut.edu.cn

工捡拾清选甜菜。人工捡拾清选甜菜存在着费时费力、收获品质差和甜菜冻伤等问题,严重制约了大面积种植效率,阻碍了甜菜产业发展进程[3-5]。

分离输送作为甜菜联合收获的重要环节,对甜菜联合收获质量具有重要影响。国外对甜菜收获机分离输送开展研究较早,德国荷马公司 T4 甜菜联合收获机采用“螺旋辊筒 + 栅状回转圆盘”两级清选输送;格立莫 REXOR630 型自走式甜菜联合收获机清洁输送系统是由 6 个螺旋辊筒 + 筛网 + 3 个栅状回转圆盘三级装置组成[6-7]。通过机-电-液技术相结合,均实现螺旋辊筒间隙自动调节、栅状圆盘转速调节智能控制,但与国内甜菜种植模式和农户购买能力不匹配[8-9]。王方艳等[10-11]研制的 2 行圆盘挖掘甜菜联合收获机采用“链杆式 + 辊筒式”两段式清选输送装置,可一次完成挖掘、输送、除土、收集作业,收获后块根含杂率很低,但挖掘出的块根带出的泥土较多,对链杆式输送带运行平稳性影响较大,易造成输送带扰动共振且收获效率较低。顾峰玮等[12]设计了一款 2 行错行甜菜联合收获机,可以一次完成打叶切顶、挖掘输送、清杂装卸作业,甜菜通过输送链加辅助传送带夹持输送,由后清理输送带过渡至笼式回转提升装置完成清选输送,作业行数少导致收获效率低。

针对上述问题,本文设计一种主要由拨送板-螺旋输送器辊筒、杆条式链筛、橡胶尾筛组成三级分离输送工艺的 6 行甜菜联合收获机,根据不同阶段甜菜和土壤分离输送的特点进行主要部件设计和工作原理分析,得出关键部件参数,并对分离输送过程中甜菜-土壤-茎叶混合物分离和甜菜损伤机理进行理论分析,明确影响土块破碎分离和甜菜机械损伤的主要因素,确定影响因素的试验取值范围,通过样机田间试验获得甜菜收获机清选输送装置的最优工作参数组合。

1 总体设计与工作原理

1.1 总体设计

根据国内甜菜主产区平作种植模式和除杂防损伤的收获要求,为达到较好的分离输送效果,同时兼顾提高收获效率,该甜菜联合收获机设计为三级分离输送的清选输送形式,一次作业 6 行,结构如图 1、2 所示。主要包括挖掘装置、拨送板-螺旋输送器辊筒装置、杆条式链筛、橡胶尾筛、回转提升带、上层转运带、料箱和装车输送臂组成,收获机通过牵引悬挂装置挂接在拖拉机后部。

甜菜收获机清选输送装置采用动力分路传递,包括机械传动和液压传动 2 部分,如图 3 所示。机

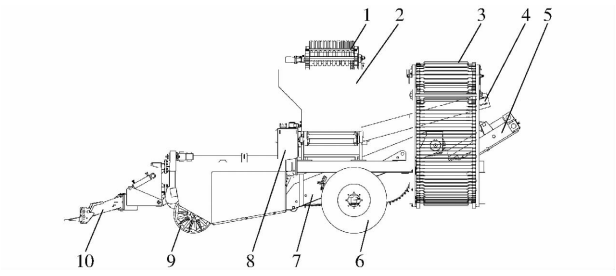
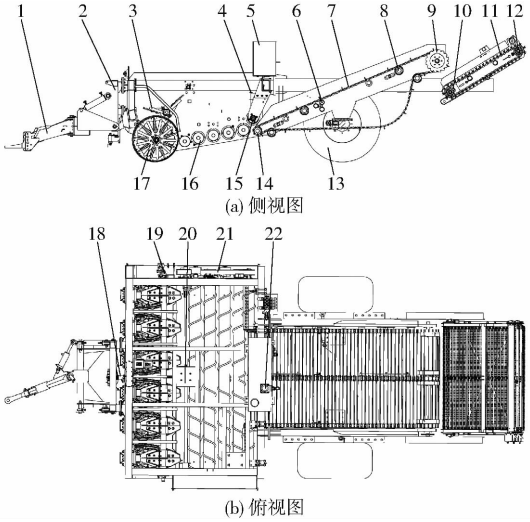


图 1 甜菜联合收获机结构图

Fig. 1 Structure diagram of sugar beet combine harvester

1. 装车输送臂 2. 料箱 3. 回转提升带 4. 上层转运筛 5. 橡胶尾筛 6. 车轮 7. 杆条式链筛 8. 油箱 9. 圆盘挖掘铲 10. 牵引架



(a) 侧视图

(b) 俯视图

图 2 三级分离输送装置结构图

Fig. 2 Three-stage separation conveying device structure diagram

1. 牵引装置 2. 机架 3. 拨送板 4. 梳草齿 5. 油箱 6. 振动轴 7. 杆条式链筛 8. 支重轮 9. 杆条式链筛驱动轮 10. 橡胶尾筛从动换向轮 11. 橡胶尾筛 12. 橡胶尾筛驱动轮 13. 车轮 14. 杆条式链筛换向轮 15. 半轴螺旋输送辊筒 16. 螺旋输送器辊筒 17. 圆盘挖掘器 18. 拖拉机后输出轴 19. 拨送板传动轴 20. 变速箱 21. 皮带 22. 齿轮泵

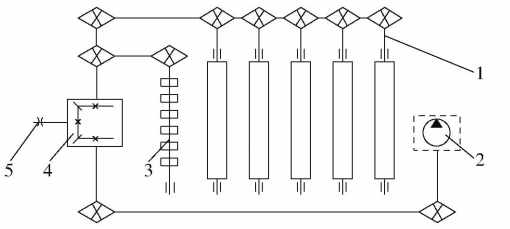


图 3 甜菜联合收获机动力传递路线

Fig. 3 Power transfer route of sugar beet combine harvester

1. 螺旋输送器辊筒轴 2. 齿轮泵 3. 拨送板 4. 变速箱 5. 传动轴

械传动由拖拉机 PTO 动力输出后经可双输出动力的变速箱换向,一路动力通过变速箱动力输出轴带动带轮驱动,将动力传递至拨送器轴和螺旋输送器辊筒轴驱动端,分别带动拨送器和螺旋输送器辊筒转动,完成对甜菜的抛送、分离去土和输送。一路动

力经变速箱输出轴带动链轮通过链条带动油箱齿轮泵为液压控制油路提供动力。通过液压控制系统分组控制链筛和尾筛液压马达转动，针对二、三级筛分离输送特点，实现不同转速运转。

1.2　工作原理及主要技术参数

整机随拖拉机牵引方向前进，甜菜和土杂混合物在挖掘器夹持作用下上升至一定高度由拨送器拨送至螺旋输送器辊筒。螺旋输送器辊筒由带轮驱动转动，拨送器拨送的甜菜和土杂混合物在螺旋输送器辊筒转动作用下向后输送，部分土块在跌落碰撞和螺旋输送器刮擦共同作用下实现甜菜-土壤分离分散和土块破碎离散，小于辊筒间隙的碎土掉落田间，实现一级分离输送；甜菜在半轴螺旋输送器辊筒引导下进入杆条式链筛装置中，在振动链筛的升运分离行程内，块根在 2 根双直杆之间滚动、摩擦，进一步清除甜菜表面黏土并通过杆条间隙落下，实现二级分离输送。甜菜完成杆条式链筛升运分离后，由链筛末端进入橡胶尾筛装置，实现三级分离输送，块根由橡胶尾筛高处回滚落至回转提升带，在缓冲减速和低位铺放双重作用下避免了块根由链筛末端直接落下造成的机械损伤，绝大部分土杂在三级分离输送装置共同作用下实现分离。甜菜联合收获机三级清选输送装置的主要技术参数如表 1 所示。

表 1　甜菜收获机清选输送装置主要技术参数

Tab.1　Main technical parameters of cleaning and sorting conveying device of sugar beet harvester

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	8 500×4 100×3 700
整机质量/kg	8 000
配套动力/kW	210
收获机行驶速度/(m·s^{-1})	0.95～2.00
收获行距/mm	500
收获行数	6
挖掘深度/mm	0～220

2　关键部件设计与参数确定

2.1　拨送器-螺旋输送器辊筒装置

拨送轮主要由橡胶板、拨送轮架和方管轴等组成，如图 4 所示。在拨送轮工作圆周内均匀分布 3 个拨送板，工作圆周半径为 355 mm。当甜菜撞击到坚硬金属时，其损伤程度将上升 3 倍[13]，故在拨送板上覆盖安装橡胶板，厚度为 12 mm，根据测得产区甜菜的三轴尺寸分布区间为 110～251 mm，为保证向后拨送的效果，确定拨送轮宽度为 261 mm。

拨送板线速度直接影响块根向后运动的距离和

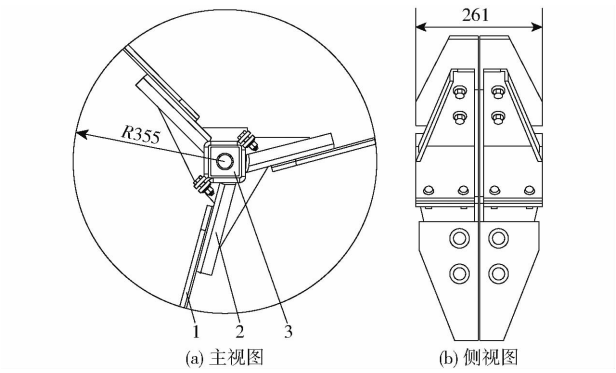


图 4　拨送轮结构图

Fig.4　Structure of dial and feed wheel

1. 橡胶板　2. 拨送轮架　3. 方管轴

速度，因此拨送板线速度 v_1 与机器前进速度 v_j 之间关系[10]为

$$v_1 = (2 \sim 4) v_j \tag{1}$$

拨送板线速度与拨送轮转速 n 之间关系为

$$n = \frac{30 \times 1\,000 v_1}{\pi R_b} \tag{2}$$

式中　R_b——拨送板外端与拨送轮旋转中心的距离，mm

由式(1)、(2)确定拨送轮转速为 80～120 r/min。

2.2　杆条式链筛装置

为获得较佳的分离输送效果，采用 5 根单直杆和 1 根双直杆的组合方式，杆条结构如图 5 所示。根据块根的最小特征尺寸，确定杆条直径为 6 mm，长度为 1 510 mm 的直杆，相邻杆条间隙为 61 mm，其中双直杆的纵向高度为 40.5 mm。单直杆保证对块茎稳定承托和输送，同时双直杆可避免因振动和筛面倾角等因素产生回流滚落，提高链筛输送效率。杆条式链筛倾角为 20°(筛面与水平地面之间的夹角)，作业时杆条式链筛倾角可通过角度调节尺进

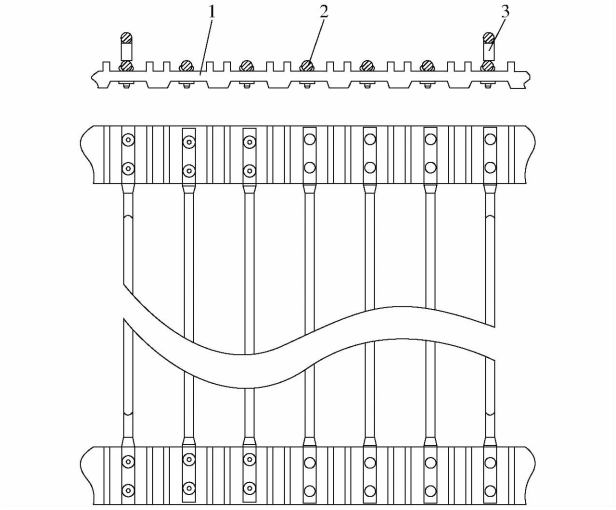


图 5　杆条结构图

Fig.5　Chain pole structure diagram

1. 皮带　2. 单直杆　3. 双直杆

行调整。

为了保证块根-土杂混合物分离输送过程不发生堵塞情况,杆条式链筛线速度 v_a 与机具前进速度关系[14-15]为

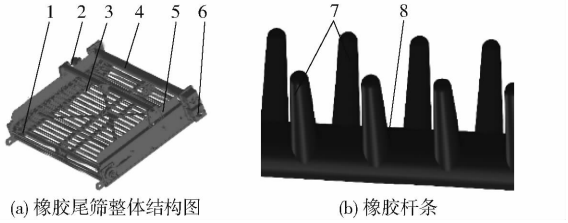
$$\lambda = \frac{v_a}{v_j} \tag{3}$$

式中 λ——速度系数,取 0.8~2.5

甜菜联合收获机前进速度为 0.95~2.00 m/s,本文 λ 取 1.2,代入式(3)得到杆条式链筛运行速度为 1.14~2.4 m/s,对于根茎类作物来说,当分离输送装置速度超过 2.0 m/s 后,其分离效果变差,故杆条式链筛速度取 1.1~2.0 m/s。

2.3 缓冲式橡胶尾筛装置

甜菜经分离升运后通过联合收获机杆条式链筛末端,甜菜直接跌落至回转提升带时,容易产生因跌落冲击碰撞导致甜菜块根损伤和甜菜表面土杂未分离干净、茎叶杂草掺杂其中等问题。为此在链筛后下方设置缓冲式橡胶尾筛,如图 6 所示,主要由侧挡板、橡胶梳齿、橡胶杆、驱动轴、从动轴和液压马达等组成,橡胶杆两端分别固定在橡胶输送带上,驱动轮带动橡胶输送带运行。



(a) 橡胶尾筛整体结构图 (b) 橡胶杆条

图 6 橡胶尾筛结构图

Fig. 6 Structure of rubber tail screen

1. 从动轴 2. 液压马达 3. 橡胶杆筛 4. 抽秧轴 5. 侧挡板 6. 主动轴 7. 橡胶梳齿 8. 橡胶杆

由链筛末端跌落的甜菜在橡胶软齿柔性作用下实现柔性回流滚落,其方向与尾筛运行方向相反,二者之间产生搓擦,可将甜菜表面残余土杂脱落并通过橡胶杆间隙落下[16]。茎叶杂草则在橡胶软齿携带下,沿筛面顺向输送至主动端抛回地表还田。缓冲式橡胶尾筛既能降低甜菜由链筛跌落至回转提升带的损伤,又能有效降低甜菜含杂率。尾筛的橡胶杆长度为 1 620 mm,直径为 15 mm,相邻橡胶杆的间隙为 62 mm,同一根橡胶杆上径向交错分布 2 排的橡胶梳齿,梳齿长度为 30 mm,同一排相邻梳齿间隙为 20 mm。

3 运动学分析

3.1 土块与螺旋输送器辊筒碰撞过程分析

甜菜在通过一级输送装置的运动过程中,由拨送板运动至螺旋输送器辊筒装置时,忽略空气阻力影响,将甜菜与螺旋输送器辊筒撞击面视为平面。在 AC 段被抛送起的甜菜做斜抛运动掉落至螺旋输送器辊筒面上,甜菜运动轨迹示意图如图 7 所示。

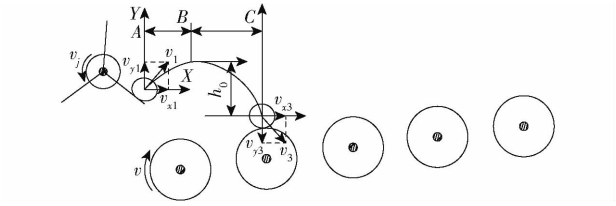


图 7 拨送板拨送过程运动学分析

Fig. 7 Kinematics analysis of transfer board transfer process

将抛离瞬间甜菜-土壤混合物作为质心原点并建立坐标系,混合物在点 A 抛离时初速度为 v_1,AB 段混合物在竖直方向分速度 v_{y1} 做匀减速运动,水平方向分速度 v_{x1} 做匀速运动,混合物上升高度为

$$h_1 = \sqrt{\frac{v_1 \sin\theta}{2g}} \tag{4}$$

式中 h_1——混合物在 AB 段的上升高度,mm

θ——拨送板抛离输送角,(°)

g——重力加速度,取 10 m/s^2

混合物在达到最高处点 B 后,在 BC 阶段受重力作用下落,混合物转为做平抛运动,在点 C 处与辊筒平面发生碰撞,则混合物在竖直方向分速度为

$$v_{y2} = \sqrt{2gh_0} \tag{5}$$

其中

$$h_0 = h_1 + h_2 \tag{6}$$

式中 h_0——混合物在 BC 段竖直方向距离,mm

h_2——混合物从拨送板末端跌落高度,mm

混合物在 BC 阶段水平方向分速度做匀速运动,混合物在点 C 处与辊筒面碰撞水平方向分速度为

$$v_{x2} = v_1 \cos\theta \tag{7}$$

混合物在 AC 阶段经过两次抛物线运动后,在点 C 处与辊筒面碰撞速度表达式为

$$v_2 = \sqrt{(v_1\cos\theta)^2 + 2g\left(\sqrt{\frac{v_1\sin\theta}{2g}} + h_2\right)} \tag{8}$$

根据两物体碰撞能量学分析,混合物中土块与辊筒面碰撞恢复系数为 0,属于完全非弹性碰撞[17],即碰撞过程中土块发生完全变形不能恢复,该系统的动能全部耗散掉,转换为土块破碎做功即该系统的机械能损失,其表达式为

$$\Delta E = \frac{m_1 m_2 (v_1 - v_3)^2}{2(m_1 + m_2)} \tag{9}$$

式中 m_1——混合物质量,kg

m_2——螺旋输送器辊筒质量,kg

v_3——螺旋输送器辊筒速度,m/s

在该碰撞系统中把螺旋输送器辊筒看成静止，即 $v_3=0$，得到混合物与螺旋输送器辊筒碰撞过程中的动能损失为

$$\Delta E_k=\frac{m_1m_2v_1^2}{2(m_1+m_2)} \tag{10}$$

综上可知，在混合物质量、螺旋输送器辊筒质量等因素确定时，混合物由拨送板抛送至辊筒筛面瞬间获取初速度越大，碰撞过程中机械能损失越大，表示土块分离破碎程度越大。

出土的甜菜表面裹土严重且土块较多，甜菜碰撞辊筒面时，表面裹土起到缓冲保护块根的作用，暂不考虑对块根的损伤。为了更好地探究拨送板转速对土块的破碎分离影响以及提高土块破碎率[18-19]，可以适当增加拨送板转速，最终确定拨送板转速为 80～120 r/min。

3.2　块根运动学分析

3.2.1　杆条式链筛末端跌落过程

分离输送时，橡胶尾筛软齿间隙较小故将橡胶尾筛面视为平面，以块根离开链筛末端瞬间位置为原点建立坐标系，水平向右为 X 轴正向，竖直向上为 Y 轴正向。忽略空气阻力的影响，甜菜脱离链筛初速度为 v_a，甜菜在水平方向做匀速直线运动速度不变，在竖直方向先做向上匀减速运动后向下做匀加速运动，t_2 时刻与尾筛面接触，运动轨迹如图 8 所示，此时甜菜与橡胶尾筛的碰撞速度为

$$v_b=\sqrt{v_{bx}^2+v_{by}^2} \tag{11}$$

式中　v_b——块茎与筛面碰撞速度，m/s

v_{bx}——块茎与筛面碰撞水平方向速度，m/s

v_{by}——块茎与筛面碰撞竖直方向速度，m/s

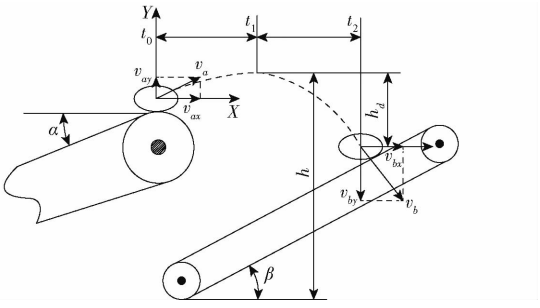


图 8　块根抛落运动学分析图

Fig. 8　Kinematic analysis of root dropping

在 t_1 时刻块根运动到最高处，块根运动转为平抛运动，直至 t_2 时刻与橡胶尾筛发生碰撞，则时间段 t_0～t_2 内位移表达式为

$$\begin{aligned}f(x)&=v_at_2\cos\alpha\\ f(y)&=\frac{g\Delta t^2}{2}\end{aligned} \tag{12}$$

其中　$\Delta t=t_2-t_1$

式中　α——链筛安装倾角，(°)

t_2 时刻块根与筛面发生碰撞时，碰撞速度 Y 轴上分量为

$$v_{by}=g\Delta t \tag{13}$$

块根从 t_0 时刻到 t_2 时刻，X 轴上碰撞速度分量为

$$v_{bx}=v_{ax}=v_a\cos\alpha \tag{14}$$

式中　v_{ax}——块根在链筛末端在 X 轴速度分量，m/s

则块根在 t_2 时刻，碰撞速度表达式为

$$v_b=\sqrt{v_a^2\cos^2\alpha+(g\Delta t)^2} \tag{15}$$

缓冲高度 h_h 与橡胶尾筛倾角 β 之间的关系为

$$\tan\beta=\frac{h_h}{v_at_2\cos\alpha}=\frac{h-h_d}{v_at_2\cos\alpha} \tag{16}$$

式中　h_d——块根跌落高度，mm

h——块根运动到最高位置时跌落高度，mm

橡胶尾筛倾角影响块根跌落位移，根据式(16)可知跌落高度与跌落时间成正比，随着块根运动时间增加碰撞速度也增加。根据上述分析，链筛速度、链筛倾角和尾筛倾角是影响块根斜抛运动碰撞速度的主要因素。

3.2.2　跌落阶段碰撞变形能量分析

尾筛面变形不计，碰撞过程中首先块根与筛面接触时局部受到压缩发生变形，在碰撞过程中存在一对相互作用力 P，块根碰撞速度逐渐变小，处于最大程度压缩状态时，碰撞局部达到最大变形量，最大变形量为 δ，碰撞速度为 0，P 达到最大值，形变势能转换为动能，部分变形恢复，直至块根弹离筛面。假设块根碰撞过程中形变完全恢复，即块根与筛面碰撞恢复系数为 1 时，表示碰撞过程无任何能量损失。

借鉴根茎类作物接触碰撞分析，对其碰撞过程应用 Hertz 理论分析，做出如下假设：不计碰撞过程块根与橡胶尾筛之间的摩擦影响，接触物体的变形小于块根和橡胶尾筛的尺寸，块根与橡胶尾筛接触表面由点逐渐形成面，接触区域为椭圆形；块根简化后形状均匀、各向同性椭球体[20-21]。

在 Hertz 接触中，等效半径 R_e 可表示为

$$\frac{1}{R_e}=\frac{1}{R_t}+\frac{1}{R_s} \tag{17}$$

式中　R_t——甜菜与橡胶尾筛接触区的法向截面的半径，mm

R_s——筛面半径，mm

由于橡胶尾筛为平面，则式(17)中 $R_s\to\infty$，设块根椭球面与筛面发生碰撞时，块根直径为 L，则 $R_t=L/2$，则等效半径 R_e 可表示为

$$R_e=\frac{L}{2} \tag{18}$$

如图 9 所示,块根接触过程中受到的法向载荷为 P,倾斜面法向方向上变形量为 δ,接触面为椭圆形,长半轴沿 x_1 轴方向,短半轴沿 y_1 轴方向。

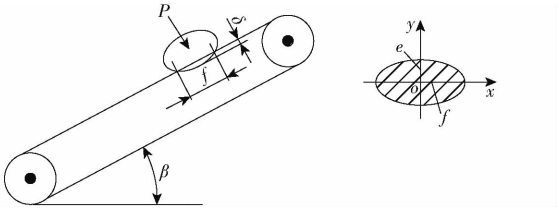


图 9 甜菜与尾筛碰撞分析图

Fig. 9 Collision analysis of sugar beet and tail sieve

接触区域的椭圆形边界方程为

$$\frac{x^2}{f^2}+\frac{y^2}{e^2}-1=0 \tag{19}$$

$$A=\pi fe \tag{20}$$

式中 A——接触区域椭圆形面积,mm^2

f——接触区域长半轴长度,mm

e——接触区域短半轴长度,mm

根据 Hertz 理论,接触压力分布函数为

$$p(x,y)=P_0\left(1-\frac{x^2}{f^2}-\frac{y^2}{e^2}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{21}$$

其中

$$P_0=\frac{3P}{2\pi fe}=\left(\frac{6PE^{*2}}{\pi^3Re^2}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{22}$$

式中 E^*——块根弹性模量

P_0——椭圆接触区域最大接触应力,MPa

x——接触区域内点横坐标值,mm

y——接触区域内点纵坐标值,mm

由式(21)可得

$$P=\frac{P_0^3\pi^3R_e^2}{6E^{*2}} \tag{23}$$

在不发生损伤的临界条件下,碰撞过程前后能量守恒,表达式为

$$\frac{1}{2}mv_e^2=\int_0^{\delta_e}P\mathrm{d}\delta=\frac{8E^*\delta_e^5}{15Re^2} \tag{24}$$

式中 v_e——块根不发生损伤的临界接触相对速度,m/s

δ_e——块根不发生损伤的临界变形量,mm

m——甜菜质量,kg

由此可得,不发生损伤的临界相对速度 v_e 为

$$v_e=\sqrt{\frac{\pi^5R^3p_y^5}{30mE^{*4}}} \tag{25}$$

式中 p_y——块根屈服应力

由上述分析可知,块根在碰撞过程中恰好不发生损伤(做功为 0)时,故碰撞速度与块根碰撞位置的曲率半径、质量、接触面的性质有关。

查阅文献可知,橡胶尾筛倾角一般为 27°~45°,尾筛倾角设置过小,块根在筛面上难以克服摩擦力,则块根与杂草、茎叶运动方向相同一起抛回田间,造成收获损失不符合工作要求;其次块根在水平和竖直方向上位移增加,使得块根碰撞速度变大,增加块根在跌落过程中摔伤几率。如果尾筛倾角设置过大,块根由筛面至升运带的竖直方向位移增加,使块根二次跌落碰撞速度变大,甚至出现块根与尾筛发生一次接触后,弹离筛面直接跌落至升运带上,尾筛无法刮擦块根表面粘附物、低位缓冲铺放的作用,引起块根损伤加重,确保尾筛实现块根回滚输送和缓冲减伤效果,最终选取尾筛倾角为 30°~45°。根据上文分析和式(3)理论计算结果,确定杆条式链筛线速度为 1.1~2.0 m/s。

4 田间试验与结果分析

4.1 试验条件

试验机器由山东省乐陵市山东思代尔农业科技装备有限公司制造,试验地位于河北省张家口市沽源县,试验地海拔为 1 536 m,气候属于大陆性草原气候,年平均气温 1.6℃,年平均降水量 426 mm。试验时间为 2020 年 10 月 3—10 日,试验地种植品种为“德国 KWS9147”。种植模式为单行平作,前期先采用纸筒育苗,后进行甜菜幼苗移栽的种植方式。种植参数为:行间距 450~500 mm、株距 200~250 mm、播深 30 mm。在收获前由甜菜杀秧机完成打叶和切顶工作后,6 行甜菜联合收获机跟进收获甜菜块根。试验设备有凯斯 210 型拖拉机、YH-M 型电子秤和 8203 型卷尺。

4.2 试验评价指标与测量方法

参照文献[22]规定的检测方法进行,选取块根含杂率、块根损伤率为清选输送装置的性能评价指标。拨送板转速通过拖拉机后输出轴转速调节、杆条式链筛速度通过调速阀手柄调节液压马达转速,橡胶尾筛倾角通过固定螺栓长度调节,沿收获机前进方向选取稳定区作业长度为 20 m,测定区长度为 20 m[22],宽度为收获机的作业幅宽的区域,分别测得含杂率、损伤率并记录,完成一次测试。块根损伤率、块根含杂率计算式为

$$G_n=\frac{G_{nt}}{G_{ng}}\times100\% \tag{26}$$

$$G_s=\frac{G_{sz}}{G_{zz}}\times100\% \tag{27}$$

式中 G_n——块根含杂率,%

G_{nt}——泥土质量,kg

G_{ng}——泥土块根质量,kg

G_s——块根损伤率,%

G_{sz}——损伤块根质量,kg

G_{zz}——块根净质量，kg

4.3　试验方案

试验以甜菜联合收获机清选输送装置的拨送板转速、杆条式链筛输送速度和橡胶尾筛倾角为试验因素；以块根含杂率、块根损伤率为试验指标，采用二次回归正交旋转组合设计方法安排试验[23-25]，其因素编码如表 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　Code of test factors

编码	因素		
	拨送板转速 x_1/(r·min^{-1})	杆条式链筛输送速度 x_2/(m·s^{-1})	橡胶尾筛倾角 x_3/(°)
-1.682	80.0	1.1	30.0
-1	86.1	1.3	33.0
0	95.0	1.6	37.5
1	103.9	1.8	42.0
1.682	110.0	2.0	45.0

表 3　试验方案及结果

Tab.3　Test scheme and results

序号	因素			块根含杂率/%	块根损伤率/%
	x_1/(r·min^{-1})	x_2/(m·s^{-1})	x_3/(°)		
1	86.1	1.3	33.0	4.1	2.9
2	103.9	1.3	33.0	2.6	3.6
3	86.1	1.8	33.0	4.0	3.7
4	103.9	1.8	33.0	2.0	3.8
5	86.1	1.3	42.0	4.9	1.8
6	103.9	1.3	42.0	4.3	2.1
7	86.1	1.8	42.0	4.7	3.1
8	103.9	1.8	42.0	3.4	3.3
9	80.0	1.6	37.5	5.3	2.8
10	110.0	1.6	37.5	2.3	3.4
11	95.0	1.1	37.5	3.8	2.5
12	95.0	2.0	37.5	2.9	4.0
13	95.0	1.6	30.0	2.7	3.7
14	95.0	1.6	45.0	4.3	2.2
15	95.0	1.6	37.5	3.4	2.9
16	95.0	1.6	37.5	3.8	3.2
17	95.0	1.6	37.5	3.3	2.7
18	95.0	1.6	37.5	3.3	3.1
19	95.0	1.6	37.5	3.6	2.6
20	95.0	1.6	37.5	3.6	2.9
21	95.0	1.6	37.5	3.4	2.8
22	95.0	1.6	37.5	3.3	3.2
23	95.0	1.6	37.5	3.3	2.7

4.4　试验结果方差分析

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，得到含杂率 Y_1 和损伤率 Y_2 的回归方程，并进行显著性检验。试验指标方差分析结果如表 4、5 所示。

表 4　含杂率方差分析

Tab.4　Variance analysis of impurity rate

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	13.7	9	1.52	34.02	<0.000 1 ***
x_1	7.99	1	7.99	178.57	<0.000 1 ***
x_2	0.80	1	0.80	17.97	0.001 0 ***
x_3	3.89	1	3.89	87.00	<0.000 1 ***
x_1x_2	0.18	1	0.18	4.02	0.066 1 *
x_1x_3	0.32	1	0.32	7.15	0.019 1 **
x_2x_3	0.020	1	0.020	0.45	0.515 4
x_1^2	0.44	1	0.44	9.77	0.008 0 ***
x_2^2	7.244×10^{-4}	1	7.244×10^{-4}	0.016	0.900 7
x_3^2	0.057	1	0.057	1.27	0.280 2
残差	0.58	13	0.045		
失拟	0.32	5	0.064	1.95	0.191 5
误差	0.26	8	0.033		
总和	14.28	22			

注：*** 表示差异极显著（$P<0.01$）；** 表示差异显著（$0.01<P<0.05$）；* 表示差异较显著（$0.05<P<0.1$），下同。

表 5　损伤率方差分析

Tab.5　Variance analysis of damage rate

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	6.47	9	0.72	20.72	<0.000 1 ***
x_1	0.39	1	0.39	11.25	0.005 2 ***
x_2	2.66	1	2.66	76.55	<0.000 1 ***
x_3	2.84	1	2.84	81.72	<0.000 1 ***
x_1x_2	0.061	1	0.061	1.77	0.206 8
x_1x_3	0.11	1	0.011	0.32	0.578 8
x_2x_3	0.28	1	0.28	8.11	0.013 7 **
x_1^2	0.048	1	0.048	1.40	0.258 4
x_2^2	0.19	1	0.19	5.37	0.037 5 **
x_3^2	7.707×10^{-5}	1	7.707×10^{-5}	2.221×10^{-3}	0.963 1
残差	0.45	13	0.035		
失拟	0.051	5	0.010	0.20	0.951 6
误差	0.40	8	0.050		
总和	6.92	22			

由表 4 可知，各项对甜菜含杂率的影响的主次顺序为 x_1、x_3、x_2、x_1^2、x_1x_3、x_1x_2、x_3^2、x_2x_3、x_2^2，其中 x_1、x_2、x_3、x_1^2 对含杂率影响极显著（$P<0.01$），x_1x_3 对含杂率影响显著（$0.01<P<0.05$），x_1x_2 对含杂率影响较显著（$0.05<P<0.1$），其他因素对含杂率影响不显著（$P>0.1$），将不显著项删除后并重新进行拟合的实际值多元二次回归方程为

$$Y_1=26.38-0.20x_1+5.04x_2-0.33x_3-0.03x_1x_2+1.80\times10^{-3}x_1x_3+3.83x_1^2 \quad (28)$$

由表 5 可知,各项对甜菜损伤率的影响的主次顺序为 x_3、x_2、x_1、x_2x_3、x_2^2、x_1x_2、x_1^2、x_1x_3、x_3^2,其中 x_1、x_2、x_3对损伤率影响极显著($P<0.01$),x_2x_3、x_2^2 对损伤率影响显著($0.01<P<0.05$),其他因素对含杂率影响不显著($P>0.1$),将不显著项删除后并重新进行拟合的实际值多元二次回归方程为

$$Y_2 = 10.57 - 2.59\times10^{-3}x_1 - 4.85x_2 - 0.23x_3 + 0.13x_2x_3 + 1.51x_2^2 \quad (29)$$

4.5 试验结果响应面

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行响应面分析,得到各试验因素对试验指标的影响规律,如图 10、11 所示。

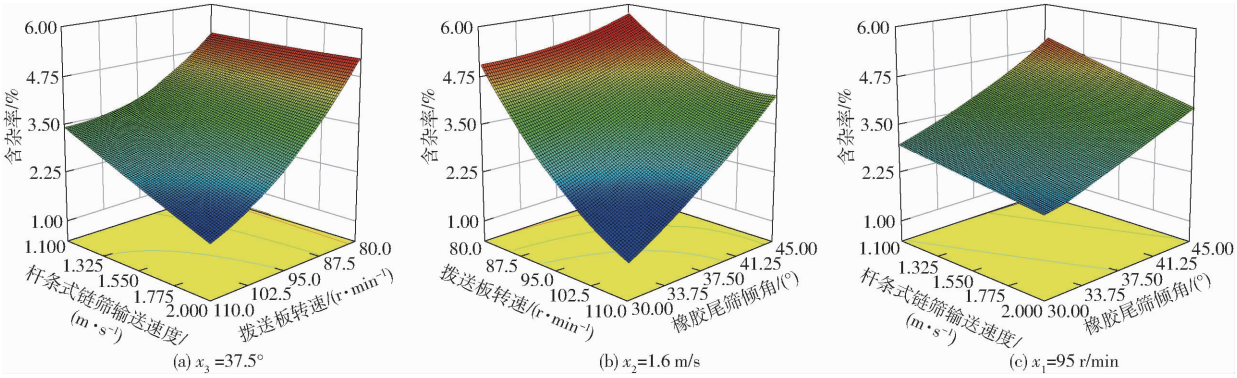


图 10 含杂率双因素影响响应曲面

Fig. 10 Response surfaces of two factors affecting impurity rate

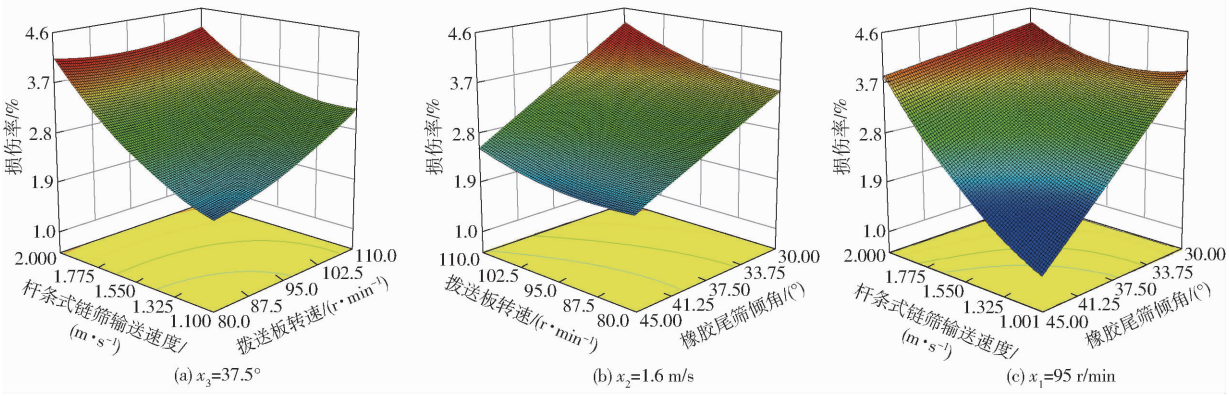


图 11 损伤率双因素影响响应曲面

Fig. 11 Response surface of two factors of damage rate

由图 10a 可知,随着拨送板转速增加,甜菜含杂率呈逐渐减小趋势,随着杆条式链筛输送速度的增加,甜菜含杂率呈逐渐增加趋势。由图 10b 可知,随着橡胶尾筛倾角增加,甜菜含杂率呈逐渐减小趋势,随着拨送板转速增加,甜菜含杂率呈逐渐减小趋势。由图 10c 可知,随着橡胶尾筛倾角增加,杆条式链筛输送速度增加,甜菜含杂率逐渐减小。

由图 11a 可知,甜菜损伤率随杆条式链筛输送速度减小,拨送板转速降低,呈减小趋势。由图 11b 可知,随着拨送板转速的增加,甜菜损伤率的变化不大,随着橡胶尾筛倾角增加,甜菜损伤率明显上升。由图 11c 可知,甜菜随杆条式链筛输送速度降低而下降,随着橡胶尾筛倾角增加而下降。

4.6 参数优化

利用 Design-Expert 8.0.6 软件参数优化模块对目标参数进行优化求解,选取最佳拨送板转速、杆条式链筛输送速度和橡胶尾筛倾角取值,以获得含杂率、损伤率的较优值。根据甜菜联合收获机的作业要求,实际收获过程中甜菜的含杂率和损伤率同等重要,因此在 Design-Expert 8.0.6 优化模块中对各个指标重要程度进行设定,含杂率和损伤率设定为“+ + +”。根据实际作业情况及相关模型分析结果得其优化求解约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(x_1,x_2,x_3) \\ \min Y_2(x_1,x_2,x_3) \\ \text{s.t.}\begin{cases} 80\ \text{r/min} \leqslant x_1 \leqslant 110\ \text{r/min} \\ 1.1\ \text{m/s} \leqslant x_2 \leqslant 2.0\ \text{m/s} \\ 30^\circ \leqslant x_3 \leqslant 45^\circ \end{cases} \end{cases} \quad (30)$$

通过优化求解,得到拨送板转速为 100.95 r/min、杆条式链筛输送速度为 1.36 m/s 和橡胶尾筛倾角为 39.31°时,含杂率为 3.55%,损伤率为 2.57%。

4.7 验证试验

根据理论预测值并考虑实际情况,取拨送板转速为 100.0 r/min、杆条式链筛输送速度为 1.4 m/s

和橡胶尾筛倾角为 39.0°，在二次回归正交旋转组合试验相同试验条件下，进行 3 次重复收获作业试验并取平均值。田间试验如图 12 所示，对试验结果进行分析统计，结果如表 6 所示，甜菜联合收获机含杂率为 3.4%、损伤率为 2.6%，与优化预测结果基本一致且均低于相关标准要求。



图 12　田间验证试验

Fig. 12　Field verification test

表 6　试验结果

Tab. 6　Test results　%

参数	含杂率	损伤率
预测值	3.55	2.57
试验值	3.40	2.60
标准值	7.00	5.00

5　结论

（1）设计的基于 6 行甜菜联合收获机三级分离输送装置采用“拨送破碎分离、集中振动升运和低位缓冲铺放”的多级输送缓冲机制，具备清土除杂、集中升运、缓冲减损、低位铺放等优点。

（2）利用 Design-Expert 8.0.6 软件建立了试验因素与指标关系的数学模型，通过方差分析得到含杂率的影响因素主次顺序为拨送板转速、橡胶尾筛倾角、杆条式链筛输送速度和损伤率的影响因素主次顺序为橡胶尾筛倾角、杆条式链筛输送速度、拨送板转速。通过响应面法分析阐述了交互效应对试验指标的影响规律。

（3）当拨送板转速为 100.0 r/min、杆条式链筛输送速度为 1.4 m/s、橡胶尾筛倾角为 39.0°时，含杂率为 3.4%，损伤率为 2.6%。在该参数组合下，甜菜含杂率和损伤率均较低，满足甜菜收获作业要求。

参　考　文　献

[1] 王申莹，胡志超，张会娟，等. 国内外甜菜生产与机械化收获分析[J]. 中国农机化学报，2013，34(3)：20－25.
WANG Shenying，HU Zhichao，ZHANG Huijuan，et al. Sugar beet production and mechanization harvest analysis in domestic and overseas[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2013，34(3)：20－25.(in Chinese)

[2] 范素香，侯书林，赵匀. 国内外甜菜生产全程机械化概况[J]. 农机化研究，2011，33(3)：12－15.
FAN Suxiang，HOU Shulin，ZHAO Yun. Overview of full mechanization of sugar beet production in domestic and overseas[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2011，33(3)：12－15.(in Chinese)

[3] 王方艳，张东兴. 圆盘式甜菜收获机自动导向装置的参数优化与试验[J]. 农业工程学报，2015，31(8)：27－33.
WANG Fangyan，ZHANG Dongxing. Parameter optimization and test on auto guide device for disc type sugar beet harvester[J]. Transactions of the CSAE，2015，31(8)：27－33.(in Chinese)

[4] 徐涛. 甜菜全程机械化高产高效栽培技术研究[J]. 南方农机，2018，49(23)：1.

[5] 王方艳，张振宇，张钦，等. 甜菜收获机齿板式切顶装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(11)：168－175.
WANG Fangyan，ZHANG Zhenyu，ZHANG Qin，et al. Design optimization and experiment of tooth-plate topping device of sugar beet harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(11)：168－175.(in Chinese)

[6] OLIVER M. Grimme shows off 653hp Rexor Platinum beet harvester[J]. Farmers Weekly，2019，170(22)：70－71.

[7] HOFFMANN C，ENGELHARDT M，GALLMEIER M，et al. Importance of harvesting system and variety for storage losses of sugar beet[J]. Zuckerindustrie，2018，143(8)：474－484.

[8] 王申莹，胡志超，CHEN Charles，等. 牵引式甜菜联合收获机自动对行系统设计与台架试验[J]. 农业机械学报，2020，51(4)：103－112.
WANG Shenying，HU Zhichao，CHEN Charles，et al. Bench test and analysis on performance of autofollow row for traction sugar beet combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(4)：103－112.(in Chinese)

[9] 王方艳. 甜菜收获工艺及挖松位置的研究[J]. 中国农机化学报，2016，37(4)：27－30.
WANG Fangyan. Research on harvesting process and digging location for sugar beet[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2016，37(4)：27－30.(in Chinese)

[10] 王方艳，张东兴. 圆盘挖掘式甜菜联合收获机设计与试验[J]. 农业工程学报，2013，29(13)：7－14.
WANG Fangyan，ZHANG Dongxing. Design and experiment of disc-dig sugar beet combine[J]. Transactions of the CSAE，2013，29(13)：7－14.(in Chinese)

[11] 王方艳. 基于 ADAMS 的输送清理装置的仿真研究[J]. 中国农机化学报，2016，37(2)：57－61.

WANG Fangyan. Simulation research on conveyor cleaning device for sugar beet based on ADAMS[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(2): 57 - 61. (in Chinese)

[12] 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-dig sugar beet combine [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 1 - 9. (in Chinese)

[13] 张洪宇. 4TS 型甜菜挖掘机输送清理装置参数优化与试验研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2020.

[14] 魏忠彩, 李洪文, 孙传祝, 等. 基于多段分离工艺的马铃薯联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019,50(1): 129 - 140.
WEI Zhongcai, LI Hongwen, SUN Chuanzhu, et al. Design and experiment of potato combined harvester based on multi-stage separation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50 (1): 129 - 140. (in Chinese)

[15] 张兆国,王海翼,李彦彬,等. 多级分离缓冲马铃薯收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(2):96 - 109.
ZHANG Zhaoguo, WANG Haiyi, LI Yanbin, et al. Design and experiment of multi-stage separation buffer potato harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 96 - 109. (in Chinese)

[16] 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)

[17] 赵凯华, 罗蔚茵. 新概念物理教学,力学[M]. 北京:高等教育出版社, 1995.

[18] 张洪宇, 万霖, 车刚, 等. 甜菜拔送机构协同配合减损试验研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(1): 49 - 53.
ZHANG Hongyu, WAN Lin, CHE Gang, et al. Experimental study on synergistic loss reduction of beet pulling mechanism [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(1): 49 - 53. (in Chinese)

[19] 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]. 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] . Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 103 - 113. (in Chinese)

[20] 兑瀚. 马铃薯收获机升运过程机械损伤分析与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学,2019.
DUI Han. Mechanical damage analysis and experimental research on potato harvester elevator[D]. Harbin: Northeast Agricultural University,2019. (in Chinese)

[21] 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学[M]. 北京:高等教育出版社, 1997.

[22] JB/T 6276—2007 甜菜收获机械试验方法[S]. 2007.

[23] 张兆国, 王法安, 张永成, 等. 自走式三七收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊):234 - 240.
ZHANG Zhaoguo, WANG Faan, ZHANG Yongcheng, et al. Design and experiment of self-propelled *Panax notoginseng* harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 234 - 240. (in Chinese)

[24] 李云雁. 试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社, 2008.

[25] 葛宜元. 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.