

拨辊推送式马铃薯收获机设计与试验

杨然兵 杨红光 尚书旗 许鹏晓 崔功佩 刘立辉

(青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109)

摘要: 针对杆条输送链式小型马铃薯收获机存在果土分离效果差、明薯率低、破皮率较高等问题,设计了一种拨辊推送式马铃薯收获机。对该收获机推送式输送分离装置的作业机理进行了研究,分析确定了输送分离装置的结构和工作参数。以机组作业速度、拨辊转速、拨辊组提升高度为试验因素,明薯率、破皮率为试验指标进行三因素二次正交旋转组合试验,运用 DPS 数据处理软件进行回归方程显著性分析,优化得出最佳因素组合为:机组作业速度 1.0 m/s,拨辊转速 60 r/min,拨辊组提升高度 150 mm,明薯率为 99.01%,破皮率为 1.24%。与普通输送分离装置对比试验结果表明:拨辊推送式马铃薯收获机在提高明薯率方面效果明显,在降低破皮率方面略有改善。

关键词: 马铃薯; 收获机; 输送分离装置; 拨辊推送式; 试验

中图分类号: S225.7⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0119-08

Design and Test of Poking Roller Shoving Type Potato Harvester

Yang Ranbing Yang Hongguang Shang Shuqi Xu Pengxiao Cui Gongpei Liu Lihui
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: Aiming at the poor separation effect, the lower rate of tuber obvious and the high rate of tuber skin-damage of the rod-link chains of small potato harvester, a poking roller shoving type potato harvester was designed, and the shoving type separate conveying device was studied. The structure and working parameters of the separate device were determined. The device adopts multi-stage roller to continuously push, and realizes the wave type backward separation and transportation of potato-soil. A specific cross mounting angle of the poking teeth on the adjacent poking roller, which ensures the movement track of the potato in the device, was a smooth curve. The quadratic orthogonal rotation combination experiment of three factors were carried out with the moving forward speed, the poking roller speed and hoisting height as experimental factors, the obvious rate and skin-damage rate as experimental indexes. The regression equation was obtained and significance analysis was carried out by using the DPS software. The results showed that the influences on the obvious rate of the respective factors decrease in the order as below, poking roller speed, moving forward speed, and hoisting height, the influences on the skin-damage rate of the respective factors decrease in the order as below, moving forward speed, poking roller speed, and hoisting height, and the moving forward speed of 1.0 m/s, the poking roller speed of 60 r/min and hoisting height of 150 mm were the best combination factors, which leaded to the obvious rate of 99.01%, and the skin-damage rate of 1.24%. The soil was broken in the process of poking tooth rotation. Potato was separated from the soil through picking and throwing of the poking tooth. Compared with the ordinary conveying device, the results show that poking roller shoving type potato harvester had good performance on improving the obvious rate, and had slightly improvement in decreasing the skin-damage rate.

Key words: potato; harvester; separate conveying device; poking roller shoving type; experiment

收稿日期: 2015-12-21 修回日期: 2016-02-07
基金项目: 山东省农机装备研发创新计划项目(2015YZ107)和山东省协同创新中心资金项目(6682215005)
作者简介: 杨然兵(1979—),男,副教授,博士,主要从事农业机械化技术研究,E-mail: yangranbing@163.com
通信作者: 尚书旗(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化技术研究,E-mail: sqshang@qau.edu.cn

引言

随着我国农业产业结构的调整,马铃薯的种植面积在不断扩大,对其机械化收获质量也提出了更高的要求。目前,国内外应用的马铃薯收获机普遍采用杆条升运链式输送分离装置^[1-3]。薯、土混合物被挖出后进入升运链前端,随升运链运动,整个过程中依靠链条的振动实现薯、土分离^[4-6]。市场上推广较多的针对丘陵山区、小区地块特点的小型马铃薯收获机主要有 1520 型、4UG-1 型、4U-83 型等,这些机型的输送装置都采用杆条式输送链结构形式,根据传动形式的不同又分为带杆式和链杆式^[7-9]。但小型马铃薯收获机纵向尺寸较短,杆条升运链的长度受到限制,升运链较短,影响分离效果。有机型设计采用安装抖动轮的方式增加薯土分离效果^[10],但又影响薯土混合物的运送,同时也增加了马铃薯的破皮率。

针对杆条输送链式收获机依靠杆条搓推果土存在的问题,本文设计一种拨辊推送式马铃薯收获机。该机采用多级拨辊连续推动,实现薯、土上下起伏波浪式向后分离输送,以改善薯土分离效果,提高明薯率。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

拨辊推送式马铃薯收获机主要由挖掘铲、传送栅杆、悬挂架、变速箱、机架、拨辊推送式输送分离装置等组成,结构简图如图 1 所示。其中,拨辊推送式输送分离装置主要由拨轮、六方拨辊轴、间隔套、传动链轮和链条等组成,六方拨辊轴包括轴 I、II、III、IV、V。

1.2 工作原理

该机采用小型拖拉机后悬挂式,拨辊推送式输送分离装置由拖拉机动力输出轴通过链传动提供动力。从拖拉机输出的动力经过变速箱变速变向后,通过链传动传递到轴 III 上,再由轴 III 分别分配到轴 II 和轴 IV,由轴 II 通过链传动分配到轴 I,轴 IV 通过链传动分配到轴 V,从而实现各级拨辊轴同步同向转动。

在机组挖掘收获过程中,马铃薯被挖掘铲挖出后,在机组前进动力的作用下,经传送栅杆,被推送到输送分离装置上,在交错拨轮的旋转推送和抛掷作用下实现薯、土的分离,分离后的土壤从拨轮间落下,马铃薯果实则被继续向后输送。拨轮在旋转推送和抛掷马铃薯的过程中与粘附在薯块表层的土壤产生摩擦,经多级拨轮的推送和抛掷作用,附着在薯块表层的土壤得到清理。

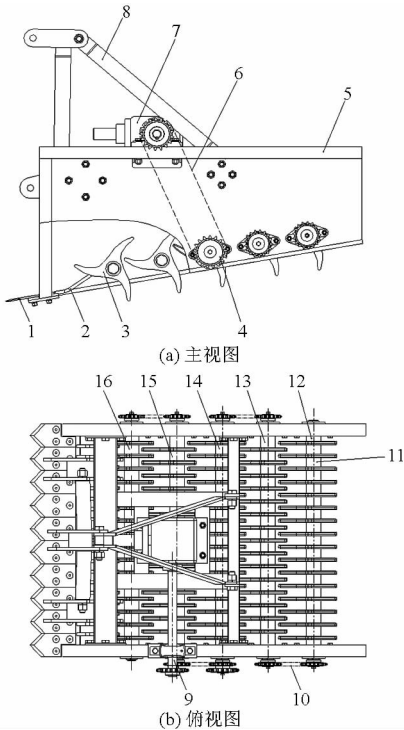


图 1 马铃薯收获机结构简图

Fig. 1 Structural diagram of potato harvester

1. 挖掘铲 2. 传送栅杆 3. 拨轮 4. 链轮 5. 机架 6. 驱动链条 7. 变速箱 8. 悬挂架 9. 驱动轴 10. 传动链 11. 间隔套 12. 轴 V 13. 轴 IV 14. 轴 III 15. 轴 II 16. 轴 I

2 输送分离装置设计

设计的拨辊推送式输送分离装置结构如图 2 所示,该装置中的拨辊均由拨轮、六方拨辊轴、间隔套组成,结构如图 3 所示。拨轮与六方拨辊轴间隙配合实现周向定位,间隔套交替排列实现轴向定位,六方拨辊轴通过带座轴承固定在收获机的侧板上,各级拨辊顺延倾斜排列,拨轮交错安装,工作时保证拨辊转速相同,拨轮相对位置不变。

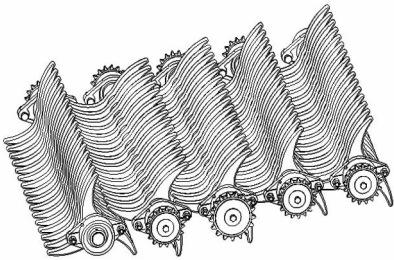


图 2 输送分离装置结构简图

Fig. 2 Structural diagram of separate conveying device

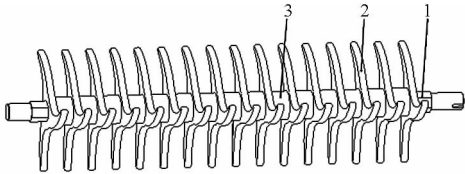


图 3 拨辊结构简图

Fig. 3 Structural diagram of poking roller

1. 六方拨辊轴 2. 拨轮 3. 间隔套

2.1 推送拨轮设计

拨轮作为拨辊推送式输送分离装置的关键零部件,其结构尺寸对机组作业效果具有重要影响。

2.1.1 拨轮齿数的确定

机组作业过程中,相邻拨辊上的拨轮之间形成持薯空间,马铃薯在此空间内受到拨齿的作用,产生滑动、滚动和跳跃运动。根据拨轮运动分析可知,拨轮齿数必须大于 2,才能保证运动的连续性;并且在相同转速下,随着拨轮齿数的增加,拨齿拨动马铃薯的频率也会增加,有利于提高薯土分离的效率;但在拨轮大小一定的情况下,随着拨轮齿数的增加,持薯空间相对减小且不均匀,如图 4 所示,图中 V_I 、 V_{II} 、 V_{III} 、 V_{IV} 为持薯空间大小。

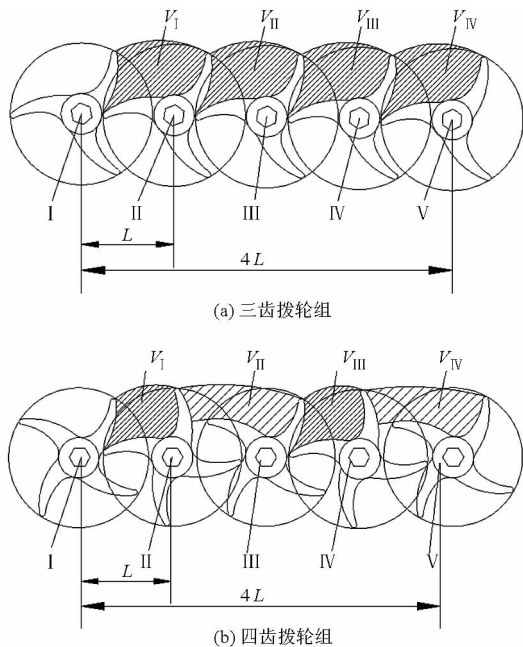


图 4 结构对比简图
Fig. 4 Comparison of structure

由图 4 可知,当拨轮齿数为 3 时,相邻两拨轮之间形成的持薯空间大小相等,即 $V_I = V_{II} = V_{III} = V_{IV}$,且空间容积较大;但是当齿数为 4 时,相邻两拨轮之间形成的持薯空间大小不等,即 $V_I = V_{III} \neq V_{II} = V_{IV}$,且容积较小;若持薯空间形状不够圆滑规整,不利于马铃薯的向后推送,并且容易导致拨轮将马铃薯剪伤,增加收获损失,故确定拨轮采用 3 齿结构。

2.1.2 拨轮尺寸及结构的确定

根据设计要求,机组作业时,马铃薯应在拨轮上实现滑动、滚动及跳跃运动。拨轮的结构决定持薯空间的形状,拨轮的尺寸决定持薯空间的大小。大的拨轮半径,有利于增大持薯空间,但是过大的拨轮半径又会使拨辊组轴距变大,造成整机结构松散、笨重,不利于小型拖拉机进行小地块的挖掘收获作业;拨轮半径过小又会直接导致输送量减小,影响挖掘

收获作业效率^[11-12]。

通过对马铃薯在被推送过程中的力学特性和运动学特性分析可知,为利于马铃薯的推送,减少其破皮率,如图 5 所示设计拨齿边线 2 为外凸的圆弧,这样两拨齿的边线 2 组成开口呈喇叭口状的持薯空间,马铃薯较容易往后推送;同时随着拨轮的旋转,马铃薯在拨齿上产生滑动和自滚动,为使马铃薯沿拨齿下滑运动时更加顺利平滑,设计拨齿的边线 1 为内凹的圆弧。

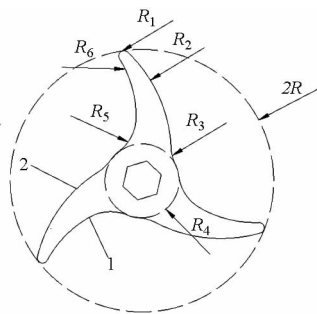


图 5 拨轮结构尺寸简图
Fig. 5 Structure and size of poking wheel
1. 拨齿边线 1 2. 拨齿边线 2

根据设计要求,机组工作时应保证分离土壤 70% ~ 80%^[13]。若推送拨轮线速度过高,马铃薯受到拨动力较大,易造成马铃薯表皮损伤;若推送拨轮线速度过小,极易造成薯土混合物的堆积,影响分离效果。参照 4U-83 型马铃薯收获机,机器收获宽度为 800 mm、机组作业速度为 1.0 m/s、推送线速度为 1.3 ~ 1.6 m/s 最佳,取其平均值,即线速度为 1.45 m/s。拨轮半径 R 与拨辊轴转速 n 的关系为: $V = 2\pi Rn$,确定拨轮半径为 230 mm。马铃薯外形可近似为椭球形,为了保证马铃薯在持薯空间内滑动、滚动,持薯空间应平滑过渡,避免出现尖角。结合马铃薯外形尺寸,设计凹凸相间的拨轮结构,每个齿段弧线形状由 6 段圆弧相切过渡组成,圆弧半径分别为: $R_1 = 5 \text{ mm}$; $R_2 = 135 \text{ mm}$; $R_3 = 40 \text{ mm}$; $R_4 = 35 \text{ mm}$; $R_5 = 40 \text{ mm}$; $R_6 = 105 \text{ mm}$ 。

2.2 拨辊组级数的确定

拨辊推送式输送分离装置通过各级拨辊组顺延倾斜排列,实现薯、土的输送和分离。根据作业原理,拨辊组的级数对薯土分离效果有重要影响。若拨辊组级数太少,达不到输送分离效果,影响明薯率;拨辊级数太多,虽然可以增加马铃薯在输送装置上的输送分离行程,但马铃薯在无土壤的缓冲保护作用下,极易造成表皮损伤。

样机分别采用 3、4、5、6 级拨辊组进行收获试验,随机选取收获作业 3 处 2 m 长范围作为测试区进行称量,计算出平均明薯率分别为 86.98%、

95.93%、99.14%、99.78%，平均破皮率分别为0.56%、1.04%、1.25%、1.89%，如图6所示。

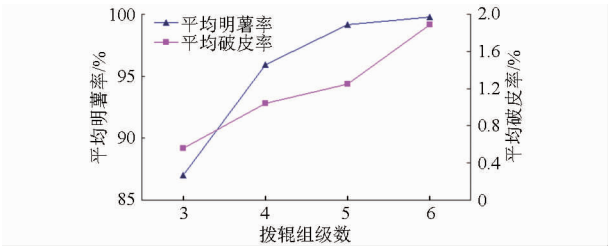


图 6 试验统计结果
Fig. 6 Statistical results of experiment

由图6可知：拨辊组级数越多，薯、土分离效果越好，但马铃薯破皮率也越高；而当拨辊组级数为5时，薯、土分离效果较好，同时破皮率也较低，故确定拨辊组级数为5。

2.3 拨轮间隙与拨辊间距的确定

拨轮间隙为同一拨辊上相邻拨轮之间的距离，主要由所收获马铃薯的尺寸确定(可通过更换间隔套调整)。经测量统计单个马铃薯平均尺寸为：长度61~107 mm，宽度45~70 mm，厚度37~52 mm。为使马铃薯不从拨轮间隙中落下，应保证拨轮间隙小于薯块最小尺寸，故确定拨轮间隙为35 mm。

拨辊间距为相邻两拨辊轴之间的距离，拨辊间距太小，极易造成薯土堆积，影响分离效果。拨辊间距太大，又会造成马铃薯从间隙中掉落，结合马铃薯尺寸和拨轮半径(230 mm)，确定拨辊间距为250 mm。

2.4 推送拨轮运动学分析

对于单一拨轮，拨轮弧段上任意一点的运动轨迹取决于该点转动的线速度 v_b (拨轮上作用点相对拨辊轴的切向速度)与机组作业速度 v 的比值^[14-15]，为了使拨轮在向上旋转的过程中对薯、土有向后拨送的作用， v_b/v 应大于1，即拨轮弧段上任意一点的运动轨迹为余摆线。

以初始位置拨轮中心为原点 O 、机组前进方向为 X 轴、垂直向上方向为 Y 轴建立坐标系，如图7所示。

在坐标系 XOY 中，沿 X 轴正向顺时针方向旋

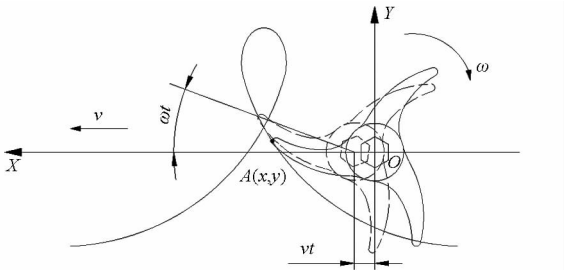


图 7 拨轮端点运动轨迹

Fig. 7 Motion trajectory of point on poking wheel

转，拨轮端点 $A(x,y)$ 经过时间间隔 t 的坐标方程为

$$\begin{cases} x = vt + R\cos(\omega t) \\ y = R\sin(\omega t) \end{cases} \tag{1}$$

式中 ω ——拨轮转动角速度
 t ——拨轮上点 $A(x,y)$ 沿 X 轴正方向顺时针转过一个角度所经过的时间

将 $\omega = 2\pi n$ 代入式(1)得

$$\begin{cases} x = vt + R\cos(2\pi nt) \\ y = R\sin(2\pi nt) \end{cases} \tag{2}$$

将式(2)位移方程对时间 t 分别求一阶导数，得到 A 点的速度方程为

$$\begin{cases} v_x = v - 2\pi nR\sin(2\pi nt) \\ v_y = 2\pi nR\cos(2\pi nt) \end{cases} \tag{3}$$

为了减少对马铃薯的划切损伤且保证拨轮拨齿对薯、土有向后推送的作用，拨轮拨齿在开始推送马铃薯时应满足 $v_x \leq 0$ ，即

$$v_x = v - 2\pi nR\sin(2\pi nt) \leq 0$$

将式(3)速度方程对时间 t 分别求一阶导数，得到 A 点的加速度方程为

$$\begin{cases} a_x = -4\pi^2 n^2 R\cos(2\pi nt) \\ a_y = -4\pi^2 n^2 R\sin(2\pi nt) \end{cases} \tag{4}$$

由以上运动学分析可知，拨轮弧段上任意一点的运动位移和运动速度主要受机组作业速度 v 、拨轮半径 R 和拨轮转速 n 的影响，加速度主要受拨轮半径 R 和拨轮转速 n 的影响。

2.5 推送过程力学特性分析

对马铃薯在拨轮上的受力状况进行力学特性分析。如图8所示，当马铃薯运动到该特定位置时，马铃薯受到两拨齿的夹持。此时马铃薯主要受到拨轮对它的拨动反力、摩擦力以及自身重力。图中 θ 为分离输送升角， F_{n1} 、 F_{n2} 为两拨轮对马铃薯的反作用力， F_{f1} 、 F_{f2} 为马铃薯受到的摩擦力， mg 为马铃薯自身所受重力， α 为两拨轮反作用力夹角， β 为马铃薯重力与 O 点法向夹角， O 点为马铃薯与拨轮接触点， a 为马铃薯重心到 O 点的距离。其中

$$F_{f1} = F_{n1}f \tag{5}$$

$$F_{f2} = F_{n2}f \tag{6}$$

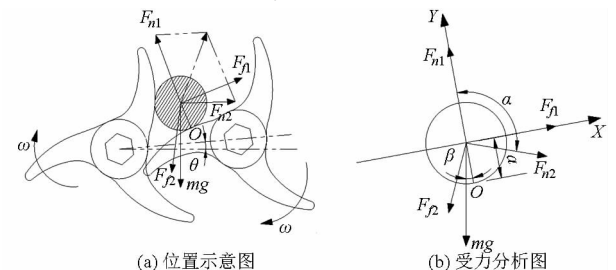


图 8 受力分析简图

Fig. 8 Diagram of force analysis

式中 f ——摩擦因数

忽略拨轮旋转引起马铃薯的离心力,则作用在马铃薯上的力对接触点 O 的力矩为

$$\sum M_O = F_{n2} a \sin(180 - \alpha) - mg a \sin\beta - F_{f2} a \sin(\alpha - 90) \tag{7}$$

将式(6)代入式(7)化简为

$$\sum M_O = F_{n2} a \sin\alpha - mg a \sin\beta + F_{n2} f a \cos\alpha$$

马铃薯能顺利被拨轮拨动往后输送到下一拨轮的必要条件为:对 O 点的合力矩大于等于零。即

$$F_{n2} (\sin\alpha + f \cos\alpha) \geq mg \sin\beta \tag{8}$$

同时还应满足沿接触点 O 切线方向的力大于等于零,即

$$F_{n2} \sin(180 - \alpha) + F_{f1} - F_{f2} \sin(\alpha - 90) - mg \sin\beta \geq 0 \tag{9}$$

化简为

$$F_{n2} \sin\alpha + F_{n1} f + F_{n2} f \cos\alpha - mg \sin\beta \geq 0$$

由以上力学特性分析可知,马铃薯被推送过程中,两反作用力 F_{n1} 和 F_{n2} 的夹角 α 变化较小,但 Y 轴负方向与重力 mg 的夹角 β 是时刻变化的,并且受分离输送升角 θ 的影响。马铃薯在推送过程中运动较为复杂,机组作业速度、拨辊转速、分离输送升角以及拨轮尺寸对马铃薯受力状况均有影响。

3 试验分析

该机配套动力为 8.8 ~ 14.7 kW 的小型拖拉机,全悬挂式,作业幅宽 800 mm,作业行数 1 行,外形尺寸(长×宽×高)为 1 250 mm×780 mm×850 mm,结构质量 240 kg,作业速度 0.8 ~ 1.2 m/s,作业深度 120 ~ 240 mm,输送分离装置为 5 级橡胶拨辊组,属于小型马铃薯收获机。

3.1 试验条件

试验在青岛弘盛汽车配件有限公司试验田进行,试验地面积为 50 m×80 m。以大西洋品种马铃薯为研究对象,种植方式为垄作,砂壤土,株距 200 mm,行距 870 mm,土壤坚实度和含水率分别为 442 kPa、8.3%。采用二次回归旋转设计进行样机性能优化,分析各因素对整机性能的影响,确定该机相对较优的参数组合。样机及试验地如图 9 所示。

3.2 试验参数和评价指标

根据上述研究分析,机组作业速度、拨辊转速及分离输送升角对该机性能影响较大。为了便于操作,通过改变拨辊组提升高度实现分离输送升角的调整。所谓拨辊组提升高度是指:依次倾斜排列的 5 级拨辊中的最后一级拨辊轴轴线到地面的距离。结合样机工作的实际情况,确定机组作业速度变化



图 9 样机及试验地

Fig.9 Prototype and test figure

范围为 0.8 ~ 1.2 m/s,拨辊转速变化范围为 40 ~ 80 r/min,拨辊组提升高度变化范围为 100 ~ 200 mm。试验根据 NY/T 1130—2006《马铃薯收获机械》相关规定,以马铃薯机械收获中重要的评价指标(明薯率 y_1 、破皮率 y_2)作为试验指标。

$$y_1 = \frac{n_1}{N} \times 100\% \tag{10}$$

$$y_2 = \frac{n_2}{N} \times 100\% \tag{11}$$

式中 n_1 ——机组作业完成后露于地表的马铃薯质量
 n_2 ——机组作业完成后表皮损伤马铃薯质量
 N ——机组作业完成后收获的马铃薯总质量

3.3 试验方案和试验结果

采用三因素二次旋转正交组合设计进行试验安排,每次试验重复 3 次取平均值作为试验指标,试验总数为 23 次。试验因素与编码如表 1 所示。

表 1 因素水平编码

Tab.1 Factors and level codes

编码	机组作业速度/ (m·s ⁻¹)	拨辊转速/ (r·min ⁻¹)	拨辊组提升 高度/mm
1.682	1.20	80.00	200.00
1	1.12	71.89	179.73
0	1.00	60.00	150.00
-1	0.88	48.11	120.27
-1.682	0.80	40.00	100.00

试验方案与结果如表 2 所示。其中 x_1 、 x_2 、 x_3 为因素编码值。

3.4 试验结果分析

试验结果采用 DPS v7.05 数据处理系统进行回归方程的显著性分析,以确定试验指标在不同试验因素水平组合下的变化规律。明薯率试验结果方差分析如表 3 所示。

由表 3 可知

$$F_2 = 12.3076 > F_{0.01}(9,13) = 4.19 \tag{12}$$

$$F_1 = 0.3363 < F_{0.05}(5,8) = 3.69 \tag{13}$$

表明试验指标回归方程和试验数据拟合较为理想,并且由表 3 可知一次项 x_1 、交互项 $x_1 x_2$ 、平方项 x_1^2 、 x_2^2 影响极为显著;一次项 x_2 影响较为显著;其他

表 2 试验方案与结果

Tab. 2 Experimental scheme and results

试验号	x_1	x_2	x_3	明薯率/%	破皮率/%
1	1	1	1	98.81	1.56
2	1	1	-1	98.52	1.52
3	1	-1	1	97.91	1.47
4	1	-1	-1	98.02	1.51
5	-1	1	1	96.49	1.42
6	-1	1	-1	96.54	1.49
7	-1	-1	1	98.20	1.12
8	-1	-1	-1	98.32	1.26
9	1.682	0	0	97.29	1.42
10	-1.682	0	0	98.67	1.61
11	0	1.682	0	97.15	1.09
12	0	-1.682	0	97.23	1.62
13	0	0	1.682	98.50	1.42
14	0	0	-1.682	98.44	1.45
15	0	0	0	99.52	1.24
16	0	0	0	99.37	1.31
17	0	0	0	98.12	1.42
18	0	0	0	98.79	1.29
19	0	0	0	99.26	1.44
20	0	0	0	98.97	1.38
21	0	0	0	99.06	1.47
22	0	0	0	99.16	1.26
23	0	0	0	98.69	1.32

表 3 明薯率试验结果方差分析

Tab. 3 Variance analysis of test results

来源	平方和	自由度	均方	F
x_1	2.663 2	1	2.663 2	20.158 1
x_2	0.497 7	1	0.497 7	3.767 2
x_3	0.000 6	1	0.000 6	0.004 6
x_1^2	1.949 0	1	1.949 0	14.751 7
x_2^2	6.297 1	1	6.297 1	47.663 3
x_3^2	0.280 0	1	0.280 0	2.119 3
x_1x_2	2.989 0	1	2.989 0	22.624 0
x_1x_3	0.015 3	1	0.015 3	0.115 9
x_2x_3	0.027 6	1	0.027 6	0.209 0
回归	14.634 4	9	1.626 0	
剩余	1.717 5	13	0.132 1	
失拟	0.298 3	5	0.059 7	
误差	1.419 2	8	0.177 4	
总和	16.352 0	22		

注： $F_{0.05}(1,13)=4.67$ ， $F_{0.01}(1,13)=9.07$ ， $F_{0.05}(5,8)=3.69$ ， $F_{0.01}(9,13)=4.19$ ，下同。

因素项影响不显著。

取 $\alpha=0.05$ 显著水平，剔除不显著项后，得到明薯率的无量纲编码值回归方程为

$$\hat{y}_1=98.993+0.442x_1+0.783x_2-0.350x_1'-0.630x_2'+0.611x_1x_2$$

(14)

由无量纲编码值回归方程系数可知试验因素对

明薯率影响大小次序为：拨辊转速、机组作业速度、拨辊组提升高度。

将各因素编码公式、中心化处理公式代入方程(14)整理后得到实际值回归方程为

$$y_1=81.225+26.611z_1+0.105z_2-24.304z_1^2-0.0044z_2^2+0.428z_1z_2$$

(15)

破皮率试验结果方差分析如表 4 所示。

表 4 破皮率试验结果方差分析

Tab. 4 Variance analysis of test results

来源	平方和	自由度	均方	F
x_1	0.086 9	1	0.086 9	13.143 3
x_2	0.169 5	1	0.169 5	25.625 8
x_3	0.001 9	1	0.001 9	0.281 8
x_1^2	0.047 5	1	0.047 5	7.177 0
x_2^2	0.000 1	1	0.000 1	0.008 8
x_3^2	0.011 1	1	0.011 1	1.670 8
x_1x_2	0.023 1	1	0.023 1	3.494 7
x_1x_3	0.005 5	1	0.005 5	0.833 5
x_2x_3	0.002 8	1	0.002 8	0.425 3
回归	0.348 0	9	0.038 7	
剩余	0.086 0	13	0.006 6	
失拟	0.031 4	5	0.006 3	
误差	0.054 6	8	0.006 8	
总和	0.434 0	22		

由表 4 方差分析，表明试验指标回归方程和试验数据拟合较为理想，并且一次项 x_2 、 x_1 影响极为显著；平方项 x_1^2 、交互项 x_1x_2 不同程度上显著；其他因素项影响不显著。根据同样的方法得到破皮率的无量纲编码值回归方程为

$$\hat{y}_2=1.348+0.112x_1+0.055x_2+0.079x_1'-0.054x_1x_2$$

(16)

由无量纲编码值回归方程系数可知试验因素对破皮率影响大小次序为：机组作业速度、拨辊转速、拨辊组提升高度。

整理后得到破皮率的实际值回归方程为

$$y_2=3.144-7.256z_1+0.043z_2+5.091z_1^2-0.038z_1z_2$$

(17)

3.5 性能分析

由上述试验的因素显著性分析可知，机组作业速度、拨辊转速对明薯率和破皮率的影响较为显著，拨辊组提升高度对明薯率和破皮率的影响不显著。采用降维法将拨辊组提升高度置于零水平，研究另外两因素的变化对明薯率和破皮率的影响，为了更直观地得到试验指标与各试验因素之间的关系，利用 Matlab 软件绘制因素影响三维等值线图进行分析，如图 10、11 所示。

由图 10 可知：在拨辊组提升高度一定的情况

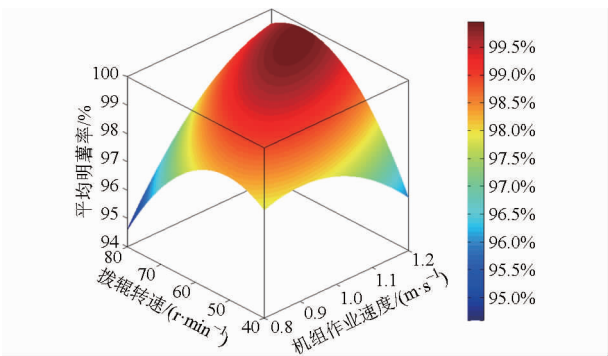


图 10 因素对平均明薯率的影响

Fig. 10 Influence of factors on average obvious rate

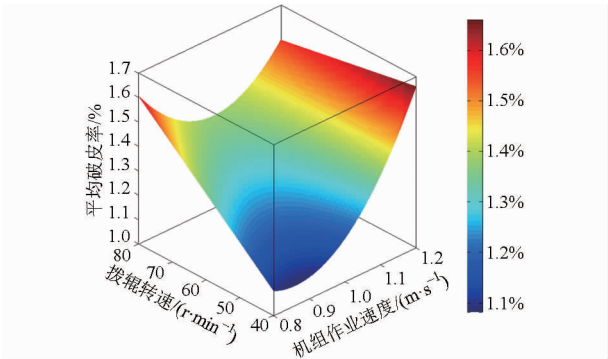


图 11 因素对平均破皮率的影响

Fig. 11 Influence of factors on average skin-damaged rate

下,随着机组作业速度的增加,明薯率随着拨辊转速的增加呈先增加后减少的趋势;随着拨辊转速的增加,明薯率随着机组作业速度的增加也是呈先增加后减少的趋势, $Y_{\max}(z_1, z_2, z_3) = Y(1.1, 71, 150) = 99.79\%$ 。

由图 11 可知:在拨辊组提升高度一定的情况下,随着机组作业速度的增加,破皮率随着拨辊转速的增加呈上升趋势;随着拨辊转速的增加,破皮率随着机组作业速度的增加呈先减后增的趋势,并且 $Y_{\min}(z_1, z_2, z_3) = Y(0.9, 45, 150) = 1.13\%$ 。

3.6 性能优化

机组收获作业过程中应保证明薯率最大,破皮率最小。根据明薯率和破皮率的回归方程,通过非线性规划原理,创建目标函数 $F = y_1 - y_2$,将所求回归方程代入目标函数,根据 NY/T 1130—2006《马铃薯收获机械》的相关要求,挖掘机的明薯率 $y_1 \geq 96\%$,破皮率 $y_2 \leq 2\%$ 。规划的目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max F = y_1 - y_2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} y_1 \geq 96\% \\ y_2 \leq 2\% \\ 0.8 \text{ m/s} \leq z_1 \leq 1.2 \text{ m/s} \\ 40 \text{ r/min} \leq z_2 \leq 80 \text{ r/min} \\ 100 \text{ mm} \leq z_3 \leq 200 \text{ mm} \end{cases} \end{cases}$$

(18)

利用 Matlab 软件进行参数优化,圆整参数优化结果:机组作业速度为 1.0 m/s、拨辊转速为 60 r/min、拨辊组提升高度为 150 mm。

根据以上最佳参数,进行 3 次重复试验,试验结果平均值为:明薯率 98.31%、破皮率 1.39%。结果表明,在最佳试验参数作用下,试验结果与理论结果相近。

4 与普通分离输送装置对比试验

以马铃薯收获作业过程中的明薯率和破皮率为指标,进行拨辊推送式马铃薯收获机与普通分离输送装置马铃薯收获机对比试验。试验选取拨辊推送式马铃薯收获机的机组作业速度为 1.0 m/s,拨辊转速为 60 r/min,拨辊组提升高度为 150 mm,普通分离输送装置选择 4U—83 型链杆式马铃薯收获机,机组前进速度为 1.0 m/s,固定式挖掘铲,挖掘深度为 220 mm,试验结果如表 5 所示。

表 5 对比试验结果

Tab.5 Results of comparative test %

序号	拨辊推送式收获机组		普通分离输送收获机组	
	明薯率	破皮率	明薯率	破皮率
1	99.81	1.26	97.21	1.15
2	99.22	1.12	98.12	1.34
3	98.91	1.39	97.36	1.55
4	99.02	1.48	96.05	1.35
5	98.49	1.21	95.40	1.36
6	99.64	1.32	94.92	1.28
7	98.28	1.16	96.25	1.16
8	98.33	1.13	93.32	1.42
9	99.79	1.25	93.28	1.21
10	98.65	1.12	95.52	1.26

为了更直观地进行试验结果分析对比,利用 Excel 软件绘制明薯率和破皮率变化折线图,如图 12、13 所示。

由表 5 和图 12 可知:普通分离输送收获机组明薯率不稳定,波动较大,但拨辊推送式收获机组明薯率稳定且明薯效果好。拨辊推送式收获机组平均明薯率为 99.01%,普通分离输送收获机组平均明薯率为 95.74%。

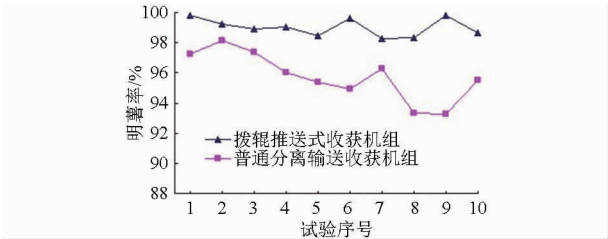


图 12 明薯率对比

Fig. 12 Comparison of obvious rate

由表5和图13可知:拨辊推送式收获机组相对于普通分离输送收获机组在减小破皮率方面略有改善。拨辊推送式收获机组平均破皮率为1.24%,普通分离输送收获机组平均破皮率为1.31%。

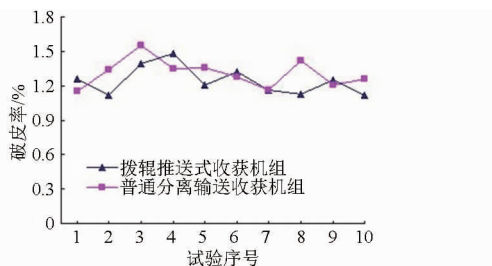


图13 破皮率对比

Fig. 13 Comparison of skin-damaged rate

5 结论

(1)针对杆条输送链式小型马铃薯收获机输送分离效果差、明薯率低、破皮率较高的问题,设计了

一种拨辊推送式马铃薯收获机,并重点研究了拨辊推送式输送分离装置。

(2)通过设计与分析,确定了拨辊推送式输送分离装置的结构和工作参数:5级橡胶推送拨辊组,每个拨轮上有3个拨齿,半径为230 mm,两相邻轴上的拨齿交叉排列。

(3)进行了样机田间性能试验,通过三因素二次正交旋转组合试验,建立了试验因素(机组作业速度、拨辊转速、拨辊组提升高度)与马铃薯收获试验指标(明薯率、破皮率)的回归方程。优化计算出了该机的最佳作业参数:机组作业速度为1.0 m/s,拨辊转速为60 r/min,拨辊组提升高度为150 mm。

(4)与普通分离输送收获机组进行了对比试验,结果表明:拨辊推送式马铃薯收获机组在提高明薯率方面效果明显,并且相对于普通分离输送收获机组在降低破皮率方面略有改善。

参 考 文 献

- LIU J F, YANG X, FENG X J, et al. The design of combined lifter for harvesting potatoes[C]//Proceedings of the International Agricultural Engineering Conference(IAEC2002), 2002: 320-323.
- 宋言明,王芬娥. 新型马铃薯联合收获机的总体设计[J]. 甘肃农业大学学报, 2009, 44(1): 151-154.
SONG Yanming, WANG Fene. Over all design of a new potato combine harvester [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2009, 44(1): 151-154. (in Chinese)
- FRITZ Joakim Rodin. Potato harvester machine: US, 2027840[P]. 1936-01-14.
- 吕金庆,魏国静,范志安,等. 4U-2B型马铃薯收获机的设计[J]. 农机化研究, 2007(9): 87-88.
LÜ Jinqing, WEI Guojing, FAN Zhian, et al. Design of 4U-2B potato harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(9): 87-88. (in Chinese)
- BOAC J M, CASADA M E, MAGHIRANG R G, et al. Material and interaction properties of selected grains and oil seeds for modeling discrete particles[J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(4): 1201-1216.
- 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)
- 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)
- 胡志超,彭宝良,尹文庆,等. 多功能根茎类作物联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 58-61.
HU Zhichao, PENG Baoliang, YIN Wenqing, et al. Design and experiment on multifunctional root-tuber crops combine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8): 58-61. (in Chinese)
- 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)
- 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)
- 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)
- 王俊发,马润轩,邵东伟,等. 玉米根茬收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 68-72.
WANG Junfa, MA Liuxuan, SAO Dongwei, et al. Design and experiment of maize root stubble harvester [J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 68-72. (in Chinese)
- 北京农业大学. 农业机械学: 下册 [M]. 北京: 农业出版社, 1997: 198.
- 吴建民,李辉,孙伟,等. 拨指轮式马铃薯挖掘机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 76-79.
WU Jianmin, LI Hui, SUN Wei, et al. Design of potato digger in poke finger's wheel type [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 76-79. (in Chinese)
- 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.