

摆动分离筛上马铃薯运动速度分析与试验

谢胜仕 王春光* 蒙建国 邓伟刚 王海超 闫建国

(内蒙古农业大学 机电工程学院,呼和浩特 010018)

摘要 研究马铃薯挖掘机摆动分离筛上马铃薯的运动过程和马铃薯运动速度对分离筛性能的影响。对马铃薯相对分离筛的运动过程进行理论分析,并推导出马铃薯绝对运动速度公式;采用高速摄像技术对薯土分离过程中马铃薯相对分离筛的运动情况进行试验研究,并通过田间试验测试出分离筛在沙土和黏土中作业时马铃薯的绝对运动速度,将试验值除以理论值得到速度修正系数。结果表明:马铃薯相对分离筛要经历正向滑动和反向滑动的连续运动过程,高速摄像试验结果与理论分析结果吻合;沙土中马铃薯绝对运动速度试验值大于理论值,速度修正系数为1.02,黏土中马铃薯绝对运动速度试验值小于理论值,速度修正系数为0.89。

关键词 马铃薯挖掘机;摆动分离筛;马铃薯;运动速度

中图分类号 S225.7⁺1

文章编号 1007-4333(2017)08-0101-08

文献标志码 A

Velocity analysis and experiment of potato on swing separation sieve

XIE Shengshi, WANG Chunguang*, MENG Jianguo, DENG Weigang, WANG Haichao, YAN Jianguo

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract To study the movement of potato on the swing separation sieve of potato digger and the effect of absolute speed of potato on the performance of separation sieve, the characteristics of potato movement relative to separation sieve are analyzed theoretically and the absolute velocity of potato movement formula is deduced. An experiment was conducted to study the movement characteristics of potato relative to separation sieve in the separation process of potato and soil by using high speed video technology. The theoretical analysis results are checked by field experiment to obtain the correction coefficient between the test value and the theoretical value of absolute velocity of potato in sandy soil and clay. The result shows potato goes through continuous forward and reverse slip movement. The results of high speed video test are in good agreement with theoretical analysis. The experimental absolute velocity of potato in sandy soil is greater than the theoretical value, and its correction coefficient is 1.02. The absolute velocity of potato in clay is less than the theoretical value, and the correction coefficient is 0.89.

Keywords potato digger; swing separation sieve; potato; velocity

马铃薯在摆动分离筛上的运动速度是影响马铃薯机械化收获效果的直接因素。摆动分离筛作为马铃薯挖掘机的重要组成部分,在曲柄和连杆机构的驱动下,将升运链上落至筛面的物料进行分离,并将薯块成条铺放于地面^[1]。马铃薯在摆动分离筛上的

运动,是分离筛和马铃薯动力学与运动学耦合作用的结果,为深入研究马铃薯在分离筛上的运动机理,对马铃薯进行运动分析非常必要。

近年来,国外对马铃薯挖掘机摆动分离筛的研究主要集中于分离筛的生产率及薯土分离过程中马

收稿日期:2016-07-12

基金项目:内蒙古自治区科技创新引导奖励基金项目(20121310);内蒙古自治区自然科学基金项目(2014MS0541, 2016MS0519);内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY16059)

第一作者:谢胜仕,博士研究生,E-mail:xieshengshi@163.com

通讯作者:王春光,教授,博士生导师,主要从事农牧业机械智能化研究,E-mail:jdwcg@imau.edu.cn

铃薯的碰撞损伤等方面^[2-7]。国内对马铃薯挖掘机分离筛的研究主要集中于分离筛的设计、选型及优化^[8-15],对筛上物料的研究,则均以马铃薯为研究对象,通过计算机仿真或室内、田间试验的方式得到马铃薯运动参数随分离筛参数的变化规律^[16-19],而关于马铃薯相对分离筛运动过程和薯土分离过程中马铃薯运动速度分析的相关研究未见报道。

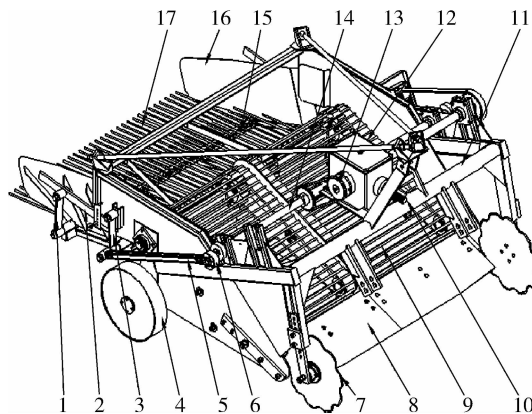
基于此,本研究拟通过建立马铃薯相对分离筛运动的数学模型解析马铃薯相对分离筛的运动过程,利用高速摄像技术对解析结果进行验证;推导马

铃薯绝对运动速度公式,利用田间试验结果修正理论计算公式,以期马铃薯挖掘机摆动分离筛的结构和工作参数的优化提供理论依据。

1 摆动分离筛总体结构及运动分析

1.1 分离筛总体结构

4SW-170型马铃薯挖掘机主要由机架、挖掘铲、升运链和分离筛等组成(图1),其中分离筛包括传动轴、减速箱、链轮传动机构、转轴、曲柄、连杆、前后摆杆、筛角调节机构、侧板和筛杆,分离筛结构参数见表1。



1. 后摆杆;2. 筛角调节机构;3. 前摆杆;4. 行走轮;5. 连杆;6. 曲柄;7. 切土圆盘;8. 挖掘铲;9. 升运链;10. 传动轴;11. 机架;12. 减速箱;13. 链轮传动机构;14. 转轴;15. 上层筛;16. 侧板;17. 下层筛

1. Rear swing link; 2. Sieve angle adjusting mechanism; 3. Front swing link; 4. Wheel; 5. Connecting rod; 6. Crank; 7. Soil cutting disc; 8. Digging shovel; 9. Elevator chain; 10. Transmission shaft; 11. Frame; 12. Reducer; 13. Sprocket drive mechanism; 14. Rotation shaft; 15. Upper sieve; 16. Side plate; 17. Lower sieve

图1 马铃薯挖掘机总体结构

Fig. 1 Overall structure of potato digger

表1 分离筛结构参数

Table 1 Structure parameters of separation sieve

参数 Project	数值 Parameter
曲柄半径/mm Crank radius	35
连杆长度/mm Connecting rod length	985
前摆杆长度/mm Front swing link length	225
后摆杆长度/mm Rear swing link length	270
筛面倾角/(°) Separation sieve incline angle	7.7
筛面长度/mm Separation sieve length	1 100
筛面宽度/mm Separation sieve width	1 700

1.2 分离筛运动分析

根据参考文献^[19]对分离筛(图2)进行运动学仿真,筛面BC通过前后摆杆BE、CD铰接于机架上,曲柄OA驱动连杆AB从而推动筛面BC往复运动。通过对分离筛进行运动仿真得出筛面做往复弧线运动。为分析方便,将筛面运动轨迹简化为直线,以振动方向为S轴(图2),分离筛面处于平衡位置作为筛面位移和时间的初始点,得出筛面任意点的位移:

$$s = r \sin \omega t \quad (1)$$

式中: s 为分离筛的位移,m。由此得出分离筛的速度及加速度分别为:

$$v = r \omega \cos \omega t \quad (2)$$

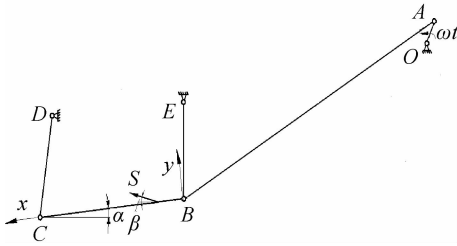
$$a = -r\omega^2 \sin\omega t \quad (3)$$

式中： v 为分离筛的速度，m/s； a 为分离筛的加速度，m/s²。分别以平行于筛面和垂直于筛面建立 x, y 坐标，则筛面任意点的加速度在 x, y 轴的分量分别为：

$$a_x = -r\omega^2 \sin\omega t \cos(\beta + \alpha) \quad (4)$$

$$a_y = -r\omega^2 \sin\omega t \sin(\beta + \alpha) \quad (5)$$

式中： a_x 为筛面任意点的加速度在 x 轴的分量，m/s²； a_y 为筛面任意点的加速度在 y 轴的分量，m/s²。



α 为筛面倾角，(°)； β 为筛面任意点的振动方向角，(°)； ω 为曲柄角速度，rad/s； t 为时间，s。

α is separation sieve incline angle, (°)； β is vibrating direction angle of separation sieve, (°)； ω is angular velocity of crank, rad/s； t is time, s.

图 2 分离筛结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of separation sieve

2 马铃薯相对分离筛运动分析

分离筛在进行薯土分离的同时要把筛面上的马铃薯向后输送，马铃薯抛离筛面会增加马铃薯破皮损伤的几率，因此，本研究仅对马铃薯不抛离筛面时的运动情况进行分析。

2.1 基本假设

薯土分离过程中筛上马铃薯存在着相互挤压、碰撞以及自身翻滚等随机运动。为分析方便，做如下假设：1)忽略马铃薯残余根系的牵连及空气阻力的影响；2)忽略马铃薯之间的相互挤压、碰撞以及自身的翻滚，将其个体视为质点。

2.2 马铃薯相对分离筛滑动过程分析

2.2.1 马铃薯正反向滑动受力分析

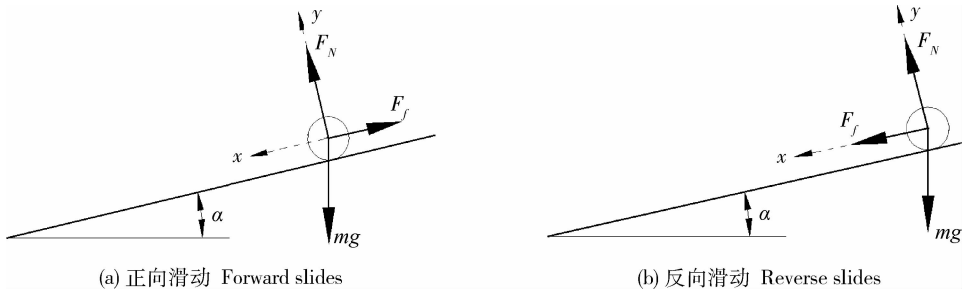
根据马铃薯相对分离筛正反向滑动时的受力情况(图 3)，得出马铃薯正反向滑动的受力平衡方程为：

$$m(a_{x_{1,2}} + a_x) = mg \sin\alpha \mp F_f \quad (6)$$

$$ma_y = F_N - mg \cos\alpha \quad (7)$$

$$F_f = \mu F_N \quad (8)$$

式中： $a_{x_{1,2}}$ 为马铃薯相对分离筛正反向滑动时的加速度，m/s²； μ 为马铃薯相对分离筛滑动时的滑动摩擦系数，试验测得 $\mu = 0.35$ 。



F_f 为马铃薯与分离筛之间的摩擦力，N； F_N 为分离筛对马铃薯的支持力，N； m 为马铃薯的质量，kg； g 为重力加速度，m/s²。

F_f is friction between potato and separation sieve, N； F_N is separation sieve to potato support force, N； m is potato mass, kg； g is acceleration of gravity, m/s²。

图 3 马铃薯相对分离筛滑动时的受力分析

Fig. 3 Mechanic analysis during the slides of potato relative to separation sieve

2.2.2 马铃薯开始正反向滑动的条件

将收获作业过程中马铃薯不抛离筛面时分离筛的结构和工作参数(分离筛参数) $r = 38.1$ mm， $\omega = 150$ r/min = 15.7 rad/s， $\beta = 10.9^\circ$ ， $\alpha = 7.7^\circ$ ，代入式(4)~(8)得到加速度 a_x 、 $g \sin\alpha - F_f/m$ 和 $g \sin\alpha + F_f/m$ 曲线(图 4(a))。马铃薯相对分离筛

开始正向滑动的瞬间 $a_x = g \sin\alpha - F_f/m$ ，开始反向滑动的瞬间 $a_x = g \sin\alpha + F_f/m$ ，由此得到马铃薯相对分离筛正向滑动时间区域(t_1, t_3)、反向滑动时间区域(t_2, t_4)。其中： t_1 和 t_2 分别为理论正向滑动开始时间和理论反向滑动开始时间，s； t_3 和 t_4 分别为理论正向滑动结束时间和理论反向滑动结束时间，s。

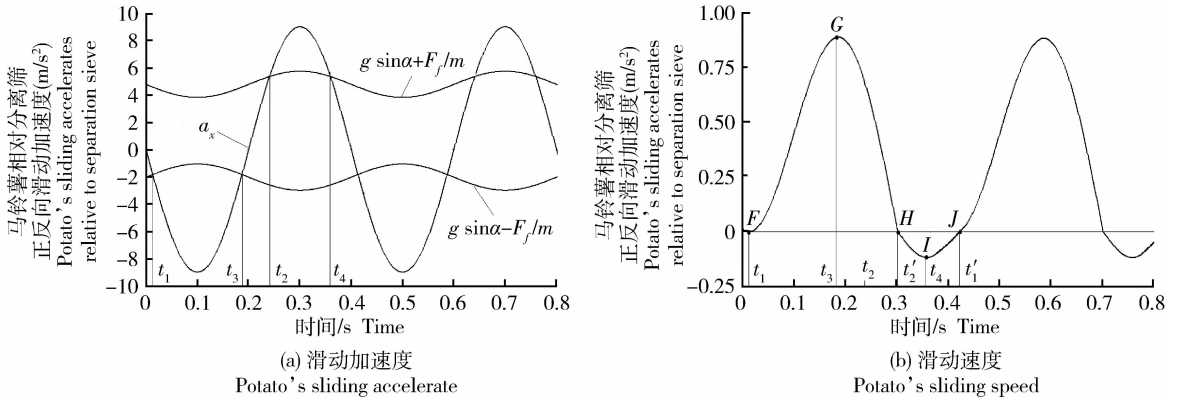


图4 马铃薯相对分离筛滑动加速度(a)和速度(b)

Fig. 4 Potato's sliding accelerate (a) and speed (b) relative to separation sieve

2.2.3 马铃薯正反向滑动速度

若理论正向滑动开始时间 t_1 小于理论反向滑动开始时间 t_2 , 马铃薯正向滑动先于反向滑动, 正向滑动速度为 0 时马铃薯结束正向滑动, 如果实际正向滑动结束时间位于非反向滑动时间区域内, 则运动是间断的, 马铃薯相对分离筛静止一段时间后在 t_2 处开始反向滑动; 如果实际正向滑动结束时间位于反向滑动时间区域内, 则运动是连续的, 马铃薯结束正向滑动即开始反向滑动。

若理论反向滑动开始时间 t_2 小于理论正向滑动开始时间 t_1 , 马铃薯反向滑动先于正向滑动, 反向滑动速度为 0 时马铃薯结束反向滑动, 如果实际反向滑动结束时间位于非正向滑动时间区域内, 则运动是间断的, 马铃薯相对分离筛静止一段时间后在 t_1 处开始正向滑动; 如果实际反向滑动结束时间位于正向滑动时间区域内, 则运动是连续的, 马铃薯结束反向滑动即开始正向滑动。

由图 4(a) 可知马铃薯相对分离筛正向滑动先于反向滑动, 则根据式(4)~(8)得出马铃薯相对分离筛正向滑动速度和反向滑动速度分别为:

$$v_{x_1} = -rw[\cos(\beta + \alpha) + \mu\sin(\beta + \alpha)](\cos\omega t - \cos\omega t_1) - g(\mu\cos\alpha - \sin\alpha)(t - t_1) \tag{9}$$

$$v_{x_2} = -rw[\cos(\beta + \alpha) - \mu\sin(\beta + \alpha)](\cos\omega t - \cos\omega t_2) + g(\mu\cos\alpha + \sin\alpha)(t - t_2) \tag{10}$$

式中: v_{x_1} 为马铃薯相对分离筛正向滑动速度, m/s; v_{x_2} 为马铃薯相对分离筛反向滑动速度, m/s; t_2' 为实际反向滑动开始时间, s。

将分离筛参数代入式(9)、(10)得到马铃薯相对分离筛正反向滑动速度曲线见图 4(b)。马铃薯相对分离筛正向滑动开始点 F 对应时间 t_1 处 $a_x = g\sin\alpha - F_f/m$, 马铃薯开始正向滑动, 速度为正, 由于 $a_x < g\sin\alpha - F_f/m$ 马铃薯相对分离筛加速运动, 至 t_3 时 a_x 再次等于 $g\sin\alpha - F_f/m$, 马铃薯正向滑动速度增至最大(G点); 此后 $a_x > g\sin\alpha - F_f/m$, 马铃薯相对分离筛做正向减速运动, 直至速度减为 0(H点), 由于 H 点对应时间落在反向滑动区间, 马铃薯相对分离筛的运动为连续运动, 即马铃薯在 H 点开始反向滑动, 至 $a_x = g\sin\alpha + F_f/m$ 时, 马铃薯反向滑动速度达到最大(I点), 此后由于 $a_x < g\sin\alpha + F_f/m$, 马铃薯反向滑动速度逐渐减小, 速度减小为 0(J点)时所对应时间 t_1' 落在正向滑动区间内, 马铃薯在 t_1' 即开始正向滑动, 如此往复运动。曲线 FGH 与速度为 0 的水平轴所包络面积大于曲线 HIJ 与速度为 0 的水平轴所包络面积, 说明马铃薯正向滑动距离大于反向滑动距离, 该分离筛参数满足向后输送物料的要求。

2.3 马铃薯绝对运动速度

将马铃薯相对分离筛正向滑动速度对时间 t 积分, 可得到马铃薯在时间段($t_2' - t_1$)内相对分离筛正

向滑动位移 s_{x_1} ；将马铃薯相对分离筛反向滑动速度对时间 t 积分,可得到马铃薯在时间段 $(t'_1 - t'_2)$ 内相对分离筛反向滑动位移 s_{x_2} ；将正反向位移之和除以正反向运动所用时间 $(t'_1 - t'_2)$ ，即可得到马铃薯绝对运动速度：

$$\bar{v}_x = \frac{s_{x_1} + s_{x_2}}{t'_1 - t'_2} = \frac{\int_{t'_2}^{t'_1} v_{x_1} dt + \int_{t'_2}^{t'_1} v_{x_2} dt}{t'_1 - t'_2} \quad (11)$$

式中： \bar{v}_x 为马铃薯绝对运动速度，m/s。

3 田间试验

田间试验包括：马铃薯相对分离筛运动过程的高速摄像试验；沙土和黏土 2 种土质时马铃薯绝对运动速度测试和分离筛性能试验。

3.1 试验条件及设备

2015 年 10 月 1—7 日在呼和浩特市前乃莫板村进行田间试验。选取沙土和黏土 2 种地块，试验地块经过杀秧处理，地块平坦，水浇地垄作，作业面积约 2 hm²，沙土含水率为 14.8%，黏土含水率 15.3%，马铃薯品种为克新 1 号。试验机型为内蒙古农业大学自行研制的 4SW-170 型马铃薯挖掘机，配套动力为约翰迪尔 904 型拖拉机，功率 66.18 kW。试验系统主要由分离筛、高速摄像机及光电转速仪组成，其中高速摄像机为美国 Vision Research 公司生产的 Phantom Miro2 高速数字摄像机；光电转速仪为广州速为电子科技有限公司生产的 TD2234B 光电转速仪，准确度为 ±0.05%，量程为 2.5~99 999 r/min，分辨率为 0.1 r/min。

3.2 试验方法

3.2.1 高速摄像试验方法

试验前，启动拖拉机进行马铃薯收获作业，使曲柄处于不同转速时观察分离筛上马铃薯是否被抛起，利用 TD2234B 光电转速仪对马铃薯处于未抛起运动状态时的曲柄转速进行测试。测试发现，当曲柄转速平均值为 150 r/min 时马铃薯不抛离筛面。因此，选择曲柄转速平均值为 150 r/min 时进行高速摄像试验，此时拖拉机前进速度为 0.8 m/s。用方钢支架将摄像机连接于挖掘机机架上(图 5)，并调整摄像机拍摄视角使其能够拍摄到马铃薯相对分离筛的运动过程。

为方便捕捉马铃薯相对分离筛运动过程的画面，该试验在沙土中进行。试验时，首先把高速摄像机置于准备记录状态，然后启动拖拉机开始挖掘马



1. 摄像机; 2. 视角调节杆; 3. 支架; 4. 计算机
1. Camera; 2. Angle adjusting link; 3. Holder; 4. Computer

图 5 高速摄像机安装图

Fig. 5 High-speed video installation diagram

铃薯并进行薯土分离，待曲柄转速稳定后，高速摄像机开始记录马铃薯在分离筛上的运动过程并保存到存储卡中，在 4 s 后自动结束记录，完成 1 次测试。

3.2.2 马铃薯绝对运动速度测试方法

马铃薯绝对运动速度测试分别在沙土和黏土中进行，将经过标记的马铃薯预埋入薯垄中，使曲柄转速保持在 150 r/min 左右对薯土混合物进行分离，记录马铃薯在筛面上的运动时间，以筛面长度除以运动时间得到 2 种不同土质中马铃薯的绝对速度。

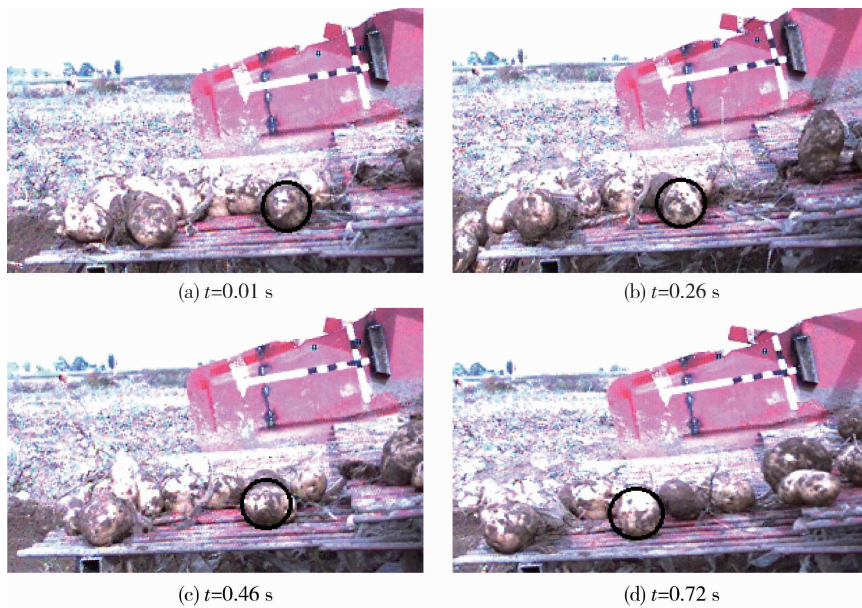
3.2.3 分离筛性能测试方法

根据 NY/T 648—2002《马铃薯收获机质量评价技术规范》^[20] 规定的试验方法测试曲柄转速为 150 r/min 时分离筛的明薯率和马铃薯破皮率。每组试验重复 3 次，试验结果取平均值。

4 马铃薯运动过程分析及平均运动速度

4.1 马铃薯运动过程分析

为验证理论分析结果，分析高速摄像试验中马铃薯相对分离筛的运动过程(图 6)。 $t=0.01$ s 时，被标记的马铃薯处于相对滑动的初始位置，初速度为零，在分离筛反向运动的作用下，在 0.26 s 时可以明显看到马铃薯相对分离筛正向滑动，正向滑动结束即开始反向滑动，直至滑到 0.46 s 所处的位置反向滑动结束，随即开始正向滑动至 0.72 s 所处位置，如此反复连续运动。马铃薯正向滑动时间大于反向滑动时间，且正向滑动距离大于反向滑动距离，与理论分析一致。



黑色圆圈内为标记马铃薯。Black circle is marked potato.

图6 马铃薯运动过程高速影像

Fig. 6 High-speed image of potato's movement on separation sieve

4.2 马铃薯绝对运动速度

将分离筛参数代入式(9)~(11)计算出曲柄转速为 150 r/min 时马铃薯绝对运动速度,将试验结果与计算结果进行对比可知:沙土中,马铃薯绝对运动速度试验值大于理论值,相对误差 $<4\%$ (表2),原因是挖掘机工作过程中拖拉机牵引和地面不平使分离筛加速度大于理论值,导致马铃薯绝对运动速度试验值较大;黏土中,马铃薯绝对运动速度

试验值小于理论值,相对误差小于 14% (表2),原因是分离筛在黏土中进行薯土分离时,马铃薯绝对运动速度除了受到拖拉机牵引和地面不平的影响外,还受到分离筛上土壤的影响,筛上土壤阻碍了马铃薯的滑动,从而使马铃薯绝对运动速度试验值较小。马铃薯绝对运动速度试验值与理论值存在差异,本研究利用修正系数表征其差异的大小。

表2 马铃薯绝对运动速度试验值与理论值的对比分析

Table 2 Comparison and analysis of the experimental value and theoretical value of the absolute velocity of potato

土质 Soil condition	试验号 Number	绝对运动速度/(m/s) Absolute velocity		相对误差/% Relative error
		试验值 Experimental value	理论值 Theoretical value	
沙土 Sand soil	1	0.351	0.344	1.99
	2	0.355		3.10
	3	0.348		1.15
黏土 Clay	1	0.317	0.344	8.52
	2	0.304		13.16
	3	0.302		13.91

分别将2种土质中马铃薯绝对运动速度试验值求均值后除以理论值,得到各土质中马铃薯绝对运动速度的修正系数,修正后的马铃薯绝对运动速度为:

$$v'_x = k \overline{v_x} = k \frac{s_{x_1} + s_{x_2}}{t_1 - t_1} = k \frac{\int_{t_1}^{t_2} v_{x_1} dt + \int_{t_2}^{t_1} v_{x_2} dt}{t_1 - t_1} \quad (12)$$

式中: v'_x 为修正后的马铃薯绝对运动速度,m/s; k 为修正系数,沙土土质时 $k=1.02$,黏土 $k=0.89$ 。

4.3 分离筛性能分析

分别测试沙土和黏土中分离筛的明薯率和马铃薯破皮率(表3)可以看出,2种土质中马铃薯的明薯率均符合NY/T 648—2002《马铃薯收获机质量评价技术规范》中明薯率 $>95\%$ 的要求,说明马铃薯不抛离筛面可达到良好的薯土分离效果;沙土中马铃薯破皮率低于黏土中的破皮率,原因是较大的绝对运动速度使马铃薯相对筛面摩擦的时间减少,从而减小了其破皮损伤的几率。性能试验表明,该分离筛参数更适合收获沙土中的马铃薯。

表3 分离筛性能试验结果

Table 3 Separation sieve performance experiment results %

土质 Soil condition	明薯率 Obvious rate	破皮率 Injury rate
沙土 Sandy soil	98.44	5.94
黏土 Clay	96.26	8.02

5 结论

1)本研究建立了马铃薯相对分离筛运动速度模型,据此分析出马铃薯相对分离筛运动过程,并利用高速摄像技术对马铃薯相对分离筛运动过程进行了验证,试验结果与理论分析结果吻合。

2)推导出了马铃薯绝对运动速度公式,并将马铃薯绝对运动速度试验值与理论值对比,得出修正系数并修正了理论计算公式。通过分离筛性能试验得出分离筛工作的较优参数:当机器前进速度为0.8 m/s,分离筛曲柄转速为150 r/min,振幅为0.038 1 m时马铃薯不抛离筛面,更适合收获沙土中的马铃薯,明薯率和马铃薯破皮率分别为

98.44%和5.94%,满足马铃薯挖掘机收获作业要求。

本研究采用理论分析和试验研究相结合的方式分析了物料不抛离摆动分离筛面时马铃薯的运动过程和不同土质对马铃薯运动速度的影响,为分离筛结构和工作参数的优化提供了理论基础。然而在含水率较高的黏土中收获马铃薯时,为提高薯土分离性能需要物料抛离筛面,马铃薯相对分离筛的运动过程更加复杂,进一步将开展这方面的研究。

参考文献 References

- [1] 贾晶霞,张东兴,杨德秋.薯类收获机振动筛伤薯机理计算机模拟与分析[J].农业机械学报,2005,36(12):67-70
Jia J X, Zhang D X, Yang D Q. Analysis and computer simulating on potatoes bruising of vibrating sieve in potatoes harvester [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(12): 67-70 (in Chinese)
- [2] Baritelle A L, Hyde G M. Specific gravity and cultivar effects on potato tuber impact sensitivity[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 29(3): 279-286
- [3] Bentini M, Caprara C, Martelli R. Harvesting damage to potato tubers by analysis of impacts recorded with an instrumented sphere[J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 94(1): 75-85
- [4] Singh R, Singh H. Comparative performance of potato digger elevator with conventional method of harvesting at farmer's fields[J]. *Potato Journal*, 2005, 31(3-4): 159-164
- [5] Geyer M O, Praeger U, König C, Graf A, Truppel I, Schlüter O, Herold B. Measuring behavior of an acceleration measuring unit implanted in potatoes[J]. *Transactions of the ASABE*, 2009, 52(4): 1267-1274
- [6] Mathew R, Hyde G M. Potato impact damage thresholds[J]. *Transactions of the ASABE*, 1997, 40(3): 705-709
- [7] Ito M, Sakai K, Hata S, Takai M. Damage to the surface of potatoes from collision[J]. *Transactions of the ASABE*, 1994, 37(5): 1431-1433
- [8] 赵满全,赵士杰,余大庆,刘汉涛,刘文忠,王政.组合分离式马铃薯挖掘机设计与研究[J].农机化研究,2007,29(4):69-72
Zhao M Q, Zhao S J, She D Q, Liu H T, Liu W Z, Wang Z. Combined separating type potato digger [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2007, 29(4): 69-72 (in Chinese)
- [9] 吕金庆,田忠恩,吴金娥,杨颖,尚琴琴,王英博,刘志鑫.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 J Q, Tian Z E, Wu J E, Yang Y, Shang Q Q, Wang Y B, Liu Z X. Design and experiment on 4U1Z vibrating potato digger [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(12): 39-47 (in Chinese)

- [10] 张华,吴建民,孙伟,罗彤娥,王蒂,张俊莲. 4UM-640型振动式马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 264-268
Zhang H, Wu J M, Sun W, Luo T E, Wang D, Zhang J L. The design and experiment of 4UM-640 vibration potato digger[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(2): 264-268 (in Chinese)
- [11] 贾晶霞,张东兴,郝新明,刘汉武. 马铃薯收获机参数化造型与虚拟样机关键部件仿真[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 64-67
Jia J X, Zhang D X, Hao X M, Liu H W. Parametric modeling and computer simulation of potato harvester parts [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(11): 64-67 (in Chinese)
- [12] 史增录,张学军,赵武云,鄢金山,魏丽娟. 4UX-550型马铃薯挖掘机振动筛运动特性分析及仿真研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(3): 156-160
Shi Z L, Zhang X J, Zhao W Y, Yang J S, Wei L J. Analysis of kinetic characteristics and simulation of vibrating sieve of 4UX-550 potato harvester[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2013, 48(3): 156-160 (in Chinese)
- [13] 魏丽娟,赵武云,牛海华. 基于ADAMS的4UD-600型马铃薯挖掘机振动机构的参数优化设计[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 278-282
Wei L J, Zhao W Y, Niu H H. Optimal design of the vibrational structure of 4UD-600 potato digger based on ADAMS[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(2): 278-282 (in Chinese)
- [14] 封莉. 马铃薯挖掘机筛分系统的性能研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2004
Feng L. The performance study of the potato digger sieve system[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2004 (in Chinese)
- [15] 赵运生,杨欣,李建平,冯晓静,刘洪杰,刘俊峰. 4U-1A型马铃薯收获机数字样机建模与仿真[J]. 农机化研究, 2010, 32(11): 122-125
Zhao Y S, Yang X, Li J P, Feng X J, Liu H J, Liu J F. Digital prototyping modeling and simulation of 4U-1A potato harvester [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2010, 32(11): 122-125 (in Chinese)
- [16] 顾丽霞. 4SW-170型马铃薯挖掘机摆动筛分离过程的仿真研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012
Gu L X. Simulation on separating process for potato of the separating of 4SW-170 potato digger [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012 (in Chinese)
- [17] 贾晶霞,杨德秋,张东兴. 马铃薯收获过程中块茎运动仿真分析[J]. 农机化研究, 2011, 33(8): 38-41, 50
Jia J X, Yang D Q, Zhang D X. Moving simulation analysis on potato tuber during harvester [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011, 33(8): 38-41, 50 (in Chinese)
- [18] 宿金殿. 基于高速摄像技术的马铃薯在分离筛上运动特性分析研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015
Su J D. Study on the movement characteristics of potato during separating based on high speed photography technology [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015 (in Chinese)
- [19] 杨莉. 马铃薯挖掘机摆动分离筛的仿真与参数优化[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009
Yang L. Simulation and optimization on parameters of separating of potato digger [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009 (in Chinese)
- [20] NY/T 648—2002 马铃薯收获机质量评价技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002
NY/T 648—2002 Technical specification of quality evaluation for potato harvesters [S]. Beijing: China Standard Press, 2002 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春