doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.007

基于离散元仿真的马铃薯收获机集薯装袋过程研究

程子文[1,2] 杨德秋[1,2] 刘萌萌[1,2] 李 洋[1,2] 陈新予[1,2]

（1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司，北京 100083；2. 农业装备技术全国重点实验室，北京 100083）

摘要： 为保证收获机作业效率的同时，降低马铃薯收获机在集薯装袋过程的伤薯率，设计了一种集薯卸袋装置，并基于离散元仿真研究马铃薯在该装置上的碰撞过程和受力情况。该装置可完成集薯、装袋、卸袋工序，保证作业过程不停机，提高机器作业效率。通过理论分析获取了升降液压缸的受力关系式并确定了升降液压缸的选型及布置形式。分析了薯块碰撞过程，获取了碰撞应力的关系表达式，并确定了应力的影响因素为箱壁与水平面的夹角和法向冲击速度；通过分析计算得到了集薯箱的结构参数范围，结合集薯卸袋装置的工作需求设计了相应的液压系统。为验证所选工作和结构参数范围的合理性及集薯装袋过程中马铃薯的受力情况，通过测定马铃薯的物料特性，赋予相应部件运动属性，进行离散元仿真试验。利用堆积角验证了颗粒模型的准确性并进行了相应的单因素仿真试验，选取各时间步颗粒所受最大力及各阶段所受力均值作为评价指标。通过分析仿真试验结果，明确了各因素对马铃薯颗粒受力的影响规律，并对工作顺序进行了相应的仿真试验，确定了马铃薯收获机集薯装袋的顺序。仿真试验结果表明，先集薯后装袋的伤薯率为1.07%、先装袋后集薯的伤薯率为3.04%。并通过田间试验验证先集薯后装袋工作顺序的正确性，田间试验结果表明，先集薯后装袋的整机作业伤薯率为2.59%，低于先装袋后集薯的整机作业伤薯率（3.71%）。

关键词： 马铃薯；集薯卸袋装置；接触参数；离散元；单因素试验

中图分类号： S225.7 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-1298(2024)S2-0062-13

Bagging Process of Potato Harvester Based on EDEM

CHENG Ziwen[1,2] YANG Deqiu[1,2] LIU Mengmeng[1,2] LI Yang[1,2] CHEN Xinyu[1,2]

（1. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*

2. *National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing* 100083, *China*）

Abstract: In order to ensure the efficiency of harvester and reduce the damage rate of potato harvester during bagging process, a kind of bagging unloading device was designed, and the collision process and stress of the potato on the device were studied based on discrete element simulation. The device can complete the processes of cache collection, bag loading and bag unloading, ensure the working process without stopping, and improve the working efficiency of the machine. Through theoretical analysis, the force relation of lifting hydraulic cylinder was obtained and the type selection and layout of lifting hydraulic cylinder were determined. The collision process of potato block was analyzed, the relation expression of the collision stress was obtained, and the influencing factors of the stress were determined as the angle between the box wall and the horizontal plane and the normal impact velocity. Through analysis and calculation, the range of structural parameters of the collecting potato box was obtained, and the corresponding hydraulic system was designed according to the working requirements of the unloading bag device of the collecting potato. In order to verify the rationality of the selected work and the range of structural parameters and the stress of the potato in the bagging process, the discrete element simulation test was carried out by measuring the material characteristics of the potato and giving the motion properties of the corresponding components. The accuracy of the particle model was verified by the stacking angle and the corresponding single factor simulation test was carried out. The maximum force of the particles at each time step and the mean value of the forces at each stage were selected as the evaluation index. By analyzing the simulation test results, the influence of various factors on the force on potato

收稿日期：2024-06-28 修回日期：2024-08-16

基金项目： 国家马铃薯产业技术体系资金项目（CARS-09-P25）

作者简介： 程子文（1998—），男，硕士生，主要从事马铃薯收获机械研究，E-mail: czw2019222@163.com

通信作者： 杨德秋（1974—），男，研究员，主要从事马铃薯生产全程机械化研究，E-mail: yangdq@maen.com.cn

particles was clarified, and corresponding simulation tests were conducted on the working sequence. The order of potato harvesting and bagging was determined. The simulation test results showed that the damage rate of potatoes collected first and then bagged was 1.07%, and the damage rate of potatoes collected first and then bagged was 3.04%. And the correctness of the working sequence of the first collecting potatoes and then bagging was verified through field experiments. The field experiment results showed that the potato damage rate during the whole machine operation of first collecting potatoes and then bagging was 2.59%, which was lower than that of the potato damage rate (3.71%) during the whole machine operation of the first bagging and then collecting potatoes.

Key words: potato; potato bag unloading device; contact parameter; discrete element; single factor experiment

0　引言

马铃薯作为我国第四大粮食作物，粮、蔬、饲、能兼用，具有极高的经济价值，自传入我国以后，开始广泛种植[1-3]。中国马铃薯产量和种植面积常居世界第一位，但有关马铃薯机械研制起步较晚，与国外发达国家相比相差甚远[4-5]。当前，马铃薯多为人工收获及半机械化式收获，收获过程用工量大、强度高、效率低，随着农业劳动力的不断减少、人口老龄化问题加剧，劳动力成本逐年升高，人工收获及半机械化收获模式难以满足市场需求和国家发展战略[6]。为解决效率问题，国内外开展了马铃薯联合收获机的研究，很大程度上缓解了人工收获和半机械收获所面临的问题[3]。

目前马铃薯联合收获机的收集装运方式主要分为3种，分别为侧输出升运装车式、料斗式、装袋(框)式。侧输出升运装车式通过侧边的马铃薯升运装置将马铃薯直接输送到运输车的车斗内，但机器作业过程需运输车跟随作业，代表机型有德国GRIMME的GT170型、中机美诺科技股份有限公司的1710A型等。料斗式则是在机器上增加可暂时集薯的料斗，有效解决了运输车跟随作业的问题，代表机型有GRIMME的VARITRON系列、黑龙江德沃科技开发有限公司的4UML-180型等。装袋(框)式则是选择吨包袋或框作为马铃薯的装载体，满足薯农需求及方便后续的运输及仓储，代表机型有日本松山株式会社生产的GSA600型、履带自走式分拣型、4UFD-1400型等[7-8]。由于国外部分收获机存在整机尺寸大、售后不及时、鲜薯收获损伤大等问题，无法满足国内对马铃薯机械化收获的指标需求，未受到国内薯农的青睐[9]。

收获期的马铃薯表皮脆嫩，在联合收获过程中，易因翻滚、碰撞、摩擦等影响马铃薯收获品质，因此国内外开展了很多有关马铃薯损伤的试验研究，但主要关注的是挖掘输送装置及升运链交界处[10-14]。根据调研发现马铃薯在收集装运过程中同样存在损伤，且当前针对于后方收集装运部分的研究较少[15]，因此有必要进行薯块碰撞过程仿真，分析集薯装袋过程中各因素对马铃薯受力的影响，降低集薯装袋过程的伤薯率。

当前，离散元仿真技术在马铃薯碰撞试验研究方面发展迅速。魏忠彩等[16]建立椭球形及类球形的薯块，进行了离散元仿真试验，明晰了薯块在不同波浪形筛面结构和运行参数下的碰撞特性。王万虎[17]利用三维扫描仪构建了较为准确的马铃薯模型，并进行了马铃薯捡拾装置的离散元试验。汪昕等[18]同样建立了类球形和椭球形马铃薯颗粒，并采用离散元软件EDEM和多体动力学软件RecurDyn耦合仿真的方式研究了马铃薯在捡拾机作业过程中的受力情况。

针对收获机工作效率低、装袋过程马铃薯受力情况难以统计的问题，本文结合北方一季作区马铃薯的收获需求[18]，设计一种自走式马铃薯收获机，收获机末端采用装吨包袋的方式进行收集，结合集薯箱实现不停机卸袋，通过理论分析结合离散元仿真的方式研究集薯卸袋装置结构及工作参数对马铃薯受力的影响。

1　集薯卸袋装置总体结构与工作原理

1.1　集薯卸袋装置总体结构

自走式马铃薯收获机主要由挖掘输送装置、驾驶室、升运输送装置、分拣输送装置、站台以及集薯卸袋装置等组成，结构如图1所示。

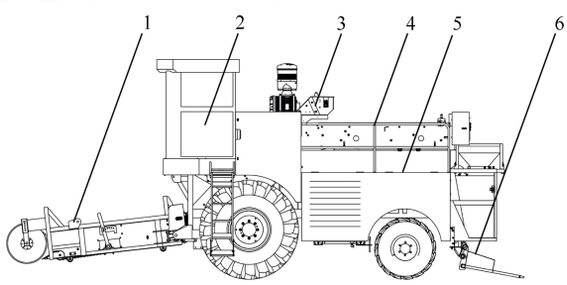


图1　马铃薯收获机整体结构图

Fig. 1　Overall structure diagram of potato harvester

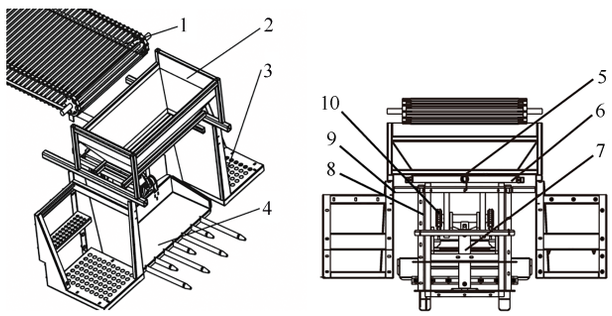
1. 挖掘输送装置　2. 驾驶室　3. 升运输送链　4. 分拣输送链　5. 站台　6. 集薯卸袋装置

集薯卸袋装置结构如图2所示，主要由分拣输送链、集薯箱、踏板、升降料斗、平移液压缸、挡薯板、升降液压缸、导轨、机架、动滑轮等组成。集薯卸袋装置结构参数如表1所示。

1.2　集薯卸袋装置工作原理

薯土混合物经过前方的挖掘、薯土分离、升运、人工

分拣后，清洁的马铃薯落入集薯卸袋装置[19]。



（a）轴测图 （b）后视图

图2 集薯卸袋装置结构示意图

Fig. 2 Schematics of structure of potato bag unloading device

1. 分拣输送链 2. 集薯箱 3. 踏板 4. 升降料斗 5. 平移液压缸 6. 挡薯板 7. 升降液压缸 8. 导轨 9. 机架 10. 动滑轮

表1 集薯卸袋装置结构参数

Tab. 1 Structural parameters of potato bag unloading device

参数	数值
长×宽×高/(mm×mm×mm)	1 900×1 370×1 200
总体质量/kg	534
分拣输送链速度/(m·s^{-1})	0～1.2
液压系统压力/MPa	16
升降料斗行程/mm	1 126

装置工作时，当集薯箱下方的挡薯板打开时，装置进入装袋过程，马铃薯在集薯箱内碰撞后落入升降料斗上方放置的吨包袋中，随着吨包袋内马铃薯的增加，升降液压缸带动升降料斗下降。等待升降料斗到达导轨下端的斜角部分时，产生如图1所示整机末端的倾斜，使得吨包袋顺利卸落在地上；待吨包袋内快装满时，通过平移液压缸推动挡薯板将集薯箱封闭，从而使得马铃薯落入集薯箱内，进入集薯过程，等待更换下方吨包袋后再将挡薯板打开，从而再次进入装袋过程，由此实现马铃薯收获机不停机卸袋作业，提升马铃薯收获机的工作效率。

2 关键结构设计

2.1 卸袋机构设计

卸袋机构如图3所示，其中滚子链和动滑轮均以升降液压缸为中心对称布置。滚子链一端固定，另一端越过动滑轮后与升降料斗相连接，此时升降料斗在竖直方向的位移为升降液压缸的两倍。升降液压缸的竖直布置，可减小卸袋机构所占空间。

为进行液压缸选型，对卸袋机构工作过程中液压缸受力进行分析。如图4所示，为方便进行理论分析，在分析过程中，不考虑滑轮和导轨之间的滚动摩擦。其中G_1为吨包袋中薯块重力与升降料斗的重力和，液压缸的力平衡方程式为

$$\begin{cases} F_N = 2T + 2T\sin\theta \\ 2F_{N1} = 2T\cos\theta \end{cases} \tag{1}$$

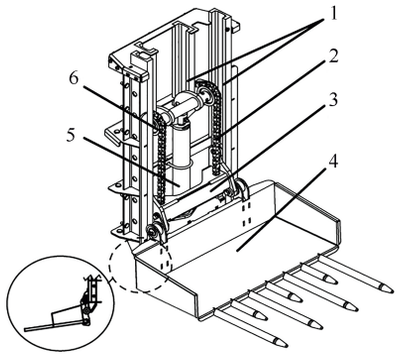


图3 卸袋机构结构图

Fig. 3 Structural diagram of unloading device

1. 升降料斗 2. 滑块 3. 滚子链 4. 导轨 5. 动滑轮 6. 升降液压缸

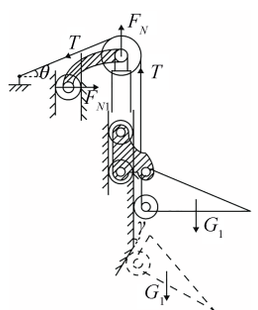


图4 卸袋装置受力图

Fig. 4 Unloading device force diagram

式中 T——滚子链拉力，N

F_N——升降液压缸推力，N

F_{N1}——液压缸滑轮受后端导轨的支持力，N

θ——滚子链左端与水平方向的夹角，(°)

从式(1)可知，升降液压缸所需提供的推力F_{N1}与滚子链的拉力T及夹角θ有关。当θ不变时，随着滚子链所受拉力的增加，F_{N1}随之增加；当重力不变时，F_{N1}随着角度的增加而增加。将卸袋机构工作过程分为竖直段和斜角段。当升降料斗在竖直段导轨工作时，此时单根滚子链的拉力T_1满足$2T_1 = G_1$。当升降料斗到达斜角段导轨时，此时的受力情况如图5所示。

如图5所示，以O_1、O_3、O_4为圆心的3个滑轮大小相等，半径为r=80 mm。为方便分析，假设吨包袋在升降料斗上保持静止。通过对点B_1和点O_3的力矩平衡分析，得出关系式

$$\begin{cases} F_{N4} = F_{N3} + F_{N2}\cos\gamma \\ 2T_2 = G_1 + 2F_{N2}\sin\gamma \\ \sum M_{B_1}(F_R) = \dfrac{G_1 L_1\cos\gamma}{2} + F_{N3}h_2 - T_2(h_4 + r\sin\gamma) - \\ \qquad F_{N4}h_3 = 0 \\ \sum M_{O_3}(F_R) = F_{N4}(h_3 - h_2) - \left(\dfrac{G_1}{2} + F_{N2}\sin\gamma\right)h_1 + \\ \qquad T_2(h_4 + r) = 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中 F_{N2}、F_{N3}、F_{N4}——导轨分别对3个滑轮的支持力，N

γ——导轨斜角段与竖直方向的夹角，(°)

T_2——斜角导轨段单根滚子链的拉力，N

$\sum M_{B_1}(F_R)$——以滑块、升降料斗为整体的平面力系在点B_1的力矩和，N·m

$\sum M_{O_3}(F_R)$——以滑块为整体的平面力系在点O_3的力矩和，N·m

h_1——O_3与O_2之间水平方向距离，取101 mm

h_2——B_1与D_1之间竖直方向距离，取170 mm

h_3——B_1与O_4之间竖直方向距离，取380 mm

h_4——滚子链点E_1与导轨C_1之间水平方向距离，取60 mm

L_1——A_1与B_1之间距离，mm

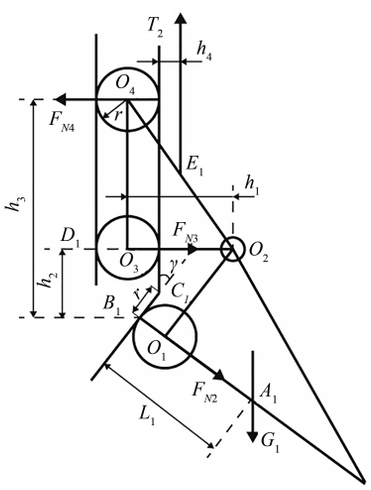


图5　斜角段受力分析

Fig. 5　Force analysis of oblique section

由式(2)可得，此时单根滚子链的拉力为

$$T_2 = \frac{G_1}{2}\frac{L_1\cos\gamma + h_2\cot\gamma}{h_2\cot\gamma + h_1 + r\sin\gamma - r} \tag{3}$$

通过对比两段工作过程中滚子链拉力的表达式可发现，滚子链在斜角段导轨时的拉力更大，经过前期试验，当γ取30°时，吨包袋可顺利卸下。

吨包袋尺寸选用900 mm × 900 mm × 1 100 mm，为保证升降料斗到达斜角导轨时，吨包袋能够完全展开，集薯箱下端出料口到斜角导轨的距离需大于1 100 mm，升降料斗尺寸需能够装下吨包袋，因此升降料斗的长、宽都取1 000 mm，应在满足卸袋预期的情况下设计集薯箱。

综上所述，L_1取最大值1 000 mm、G_1取1 070g，g为重力加速度(m/s^2)，液压缸行程为600 mm。结合式(1)、(3)，当料斗到达底部时取$F_N = 2T_2$，液压缸工作时的工作压力P_g为16 MPa，液压缸负载率β为80%。因此，升降液压缸的力平衡方程为

$$F_N = \frac{\pi}{4}D_{Li}^2 P_g \beta \tag{4}$$

式中　D_{Li}——升降液压缸缸筒内径，mm

代入数值计算后可得液压缸缸筒的内径为58.37 mm，查询《机械设计手册》，根据液压缸尺寸参照表，取D_{Li}=63 mm，依据工作压力选择液压缸活塞杆杆径为d_{Li}=0.7D_{Li}=44.1 mm，根据液压缸活塞杆尺寸参照表，取d_{Li}=45 mm。

2.2　集薯机构设计

为实现不停机卸袋功能，需对集薯机构进行设计，集薯机构简图如图6所示。

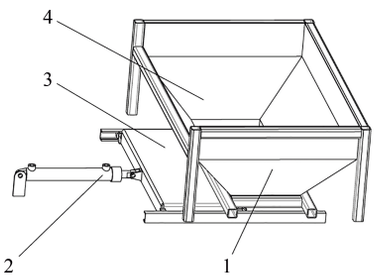


图6　集薯机构简图

Fig. 6　Schematic of potato mechanism

1. 集薯箱　2. 平移液压缸　3. 挡薯板　4. 柔性材料

集薯机构主要由集薯箱、平移液压缸、挡薯板、箱体内的柔性材料组成。其中平移液压缸的运动带动挡薯板进行滑动，使得集薯箱下方可以封闭和开启。经过前期试验选择包裹聚氨酯海绵的丁腈橡胶作为壁面的柔性材料[20]。

设马铃薯与集薯箱开始接触时法向动能为E_{kn}，柔性材料只考虑弹性。受马铃薯内部弹性阻尼的影响，薯块在撞击箱壁时，撞击面的法向速度减小。当马铃薯的法向速度为0时，此时法向动能变为0[21]，设此时马铃薯的变形量为Δd，之后马铃薯进入形变恢复阶段，薯块的法向动能和势能变化量应等于薯块的应变能[22]，即

$$\begin{cases} E_{kn} = \dfrac{1}{2}mv_n^2 \\ E_{kn} + E_{p1} = E_\varepsilon \\ E_{p1} = mg\dfrac{\Delta d}{\cos\alpha} \end{cases} \tag{5}$$

式中　m——马铃薯质量，kg

v_n——马铃薯碰撞时刻法向速度，m/s

E_{p1}——马铃薯碰撞过程势能变化量，J

E_ε——马铃薯应变能，J

α——集薯箱箱壁与水平面夹角，(°)

设马铃薯速度为零时，薯块的动载荷为F_d，此时马铃薯的动载荷做功应与马铃薯的应变能相等，即

$$E_\varepsilon = \frac{1}{2}F_d\Delta d \tag{6}$$

在线弹性范围内，马铃薯以静载荷形式压在相同的材料上，静载荷大小为mg，设此时的静变形和静应变分别为Δs和σ_s，与在F_d载荷下的变形量Δd和应力σ_d线性相关，即

$$\frac{F_d}{mg} = \frac{\Delta d}{\Delta s} = \frac{\sigma_d}{\sigma_s} \tag{7}$$

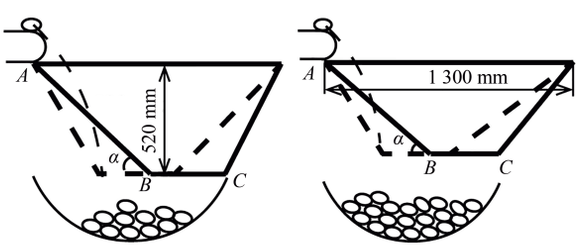
联立式(5)~(7)得

$$\begin{cases}\sigma_d = \dfrac{\sigma_s}{\cos\alpha} + \sigma_s\sqrt{\dfrac{1}{\cos^2\alpha} + \dfrac{v_n^2}{g\Delta s}} \\ F_d = \dfrac{mg}{\cos\alpha} + \sqrt{\dfrac{m^2g^2}{\cos^2\alpha} + \dfrac{m^2v_n^2g}{\Delta s}}\end{cases} \tag{8}$$

由上述分析可知，马铃薯在碰撞过程中，箱壁与水平面的夹角和法向冲击速度均会影响马铃薯在碰撞过程中的应力，从而造成马铃薯碰撞损伤。

过高的分拣输送链速度会导致分拣人员劳动强度大、分拣不净，造成机器作业含杂率过高；速度过低则会造成马铃薯堆积在分拣输送链上，降低整机作业效率。结合前期调研和试验，选取分拣输送链速度范围在0.4～0.8 m/s之间。

集薯箱尺寸范围如图7所示。薯箱的设计需考虑薯箱的布置空间、内部容积及马铃薯与壁面材料之间的摩擦因数。结合吨包袋的竖直方向上完全展开的长度1 100 mm及分拣输送链的安装距地面高度2 120 mm可知，集薯箱在竖直方向的深度需小于520 mm，水平方向不易过长，结合设计经验控制在1 300 mm以内。为了不影响两侧分拣人员上下车，横向尺寸固定为1 200 mm，且靠近出料口附近的横向尺寸需小于吨包带的开口尺寸，为方便体积计算，在计算过程中将薯箱横向尺寸统一为1 200 mm，为防止挡薯板撤回途中造成马铃薯疲劳损伤及薯块的顺畅下落，根据前期试验，取挡薯板的长度为350 mm，即图7中BC段长度，取分拣输送链的厚度为200 mm。根据前期试验，为保证在换袋过程中，薯箱内马铃薯不溢出，设计薯箱内可容纳0.5 t马铃薯，根据前期马铃薯物料特性分析，取马铃薯密度为ρ = 1 065 kg/m^3，因此集薯箱体积为0.469 5 m^3，横向尺寸为1 200 mm，则薯箱侧面积为0.391 2 m^2。



(a) 竖直方向最大尺寸520 mm (b) 水平方向最大尺寸1 300 mm

图7 集薯箱尺寸范围示意图

Fig. 7 Size range diagrams of potato box

如图7a所示，取集薯箱竖直方向尺寸最大为520 mm，集薯箱上端尺寸则为1 155 mm，当集薯箱下端出料口贴近吨包袋右侧时，此时的集薯箱壁面角度α为43.39°，L_{AB}=757 mm。当出料口向左移动时，需考虑马铃薯以最大速度抛出时不能直接落入吨包袋，因此当马铃薯以速度0.8 m/s抛出时，取马铃薯下落高度为720 mm，此时马铃薯横向位移为307 mm，则此时α为59.44°，L_{AB}=604 mm。

如图7b所示，取集薯箱上端最大水平尺寸为1 300 mm时，集薯箱竖直方向尺寸为474 mm，当集薯箱下端出料口在吨包带最右侧时，α为40.76°，L_{AB}=726 mm。当马铃薯以速度0.8 m/s抛出时，结合马铃薯下落高度为674 mm，此时马铃薯横向位移为297 mm，α为57.93°，L_{AB}=559 mm。综上所述，选取α范围为40°～60°，箱体壁面长度L_{AB}范围为560～760 mm。

设0.5 t马铃薯全部作用在挡薯板上，忽略挡薯板下方滑轮的滚动摩擦，根据前期测量的马铃薯与丁腈橡胶的静摩擦因数为0.546 4，取液压缸的负载率为80%，则平移液压缸所受拉力为2 545.06 N，平移液压缸的力平衡方程为

$$F_{tr} = \frac{\pi}{4}\left(D_{tr}^2 - d_{tr}^2\right)P_g\beta \tag{9}$$

式中 F_{tr}——平移液压缸所受拉力，N

D_{tr}——平移液压缸缸筒内径，mm

d_{tr}——平移液压缸活塞杆外径，mm

代入具体数值后可得所需平移液压缸需满足关系式为$D_{tr}^2 - d_{tr}^2 \geqslant 253$ mm^2，由于可结合节流阀降低液压缸的移动速度，选取平移液压缸时取其可达到的最大关闭速度为参考。考虑液压缸的可靠性取平移液压缸缸筒内径为25 mm，活塞杆外径为16 mm，平移液压缸行程为350 mm。

2.3 液压系统设计

根据集薯卸袋装置的工作原理设计集薯卸袋装置液压原理图，如图8所示，二位二通电磁阀在常态位置时，系统处于卸荷状态，液压油直接流回油箱，当2个三位四通电磁阀通过按钮接通时，二位二通电磁换向阀同时接通，从而使得液压油可以进入液压缸中，考虑到升降液压缸所受载荷，三位四通电磁换向阀的中位机能选为Y型。为防止平移液压缸出现浮动，三位四通电磁换向阀Ⅱ的中位机能选为O型。液压锁由2个相互连接的液压单向阀组成，使得三位四通电磁换向阀Ⅰ在中位时，升降液压缸处于双向锁紧状态，单向可调式节流阀能够控制升降液压缸下降速度。液压缸在工作时，当工作压力超过溢流阀所设定压力时，溢流阀接通，使得油路中的工作压力始终保持在溢流阀额定压力范围内。

3 仿真试验

为探究集薯装袋过程中各环节马铃薯受力情况及所选箱体结构参数和工作参数对薯块受力的影响，对集薯装袋过程离散元进行仿真试验[23]。

3.1 物料特性测量

如图9所示，采用排水法测量马铃薯密度，取10个马铃薯，每个马铃薯切取5个大小相似的薯块，利用电子秤称量并记录质量为M_p。为防止水滴溅在量筒内壁上影响试验的准确性，采用滴管将100 mL量筒内的水加至80 mL处，此时量筒内体积为V_f，使用镊子将马铃薯薯块放入量筒内的水中后松开样品，待水面静止后，记录此时

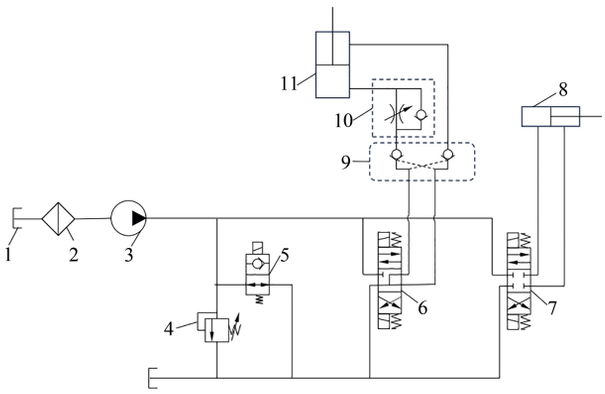
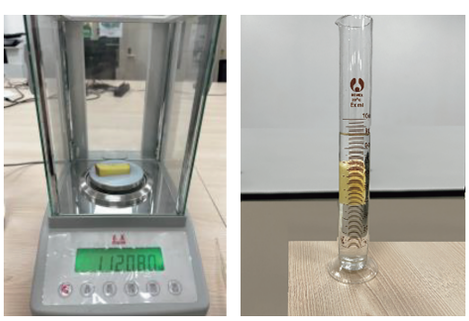


图8　液压系统原理图

Fig. 8　Hydraulic system schematic

1. 油箱　2. 滤油器　3. 液压泵　4. 溢流阀　5. 二位二通电磁阀
6. 三位四通电磁阀Ⅰ　7. 三位四通电磁阀Ⅱ　8. 平移液压缸
9. 液压锁　10. 单向可调式节流阀　11. 升降液压缸



(a)质量测量　　(b)体积测量

图9　马铃薯密度测量

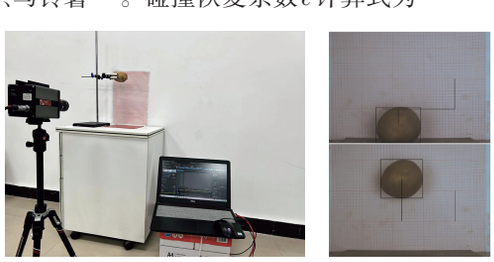
Fig. 9　Schematics of potato density measurement

的体积为V_l，计算其密度ρ，取算术平均值[24]，计算式为

$$\rho = \frac{M_\rho}{V_f - V_l} \tag{10}$$

试验测得马铃薯密度平均值为1.065 2 g/cm^3。

马铃薯碰撞恢复系数测量如图10所示，首先利用高速摄像机获取马铃薯碰撞反弹的图像，利用坐标纸获取马铃薯的碰撞反弹高度为H_u，设置下落高度为300 mm，每组试验重复5次，取平均值，碰撞材料为Q235钢、丁腈橡胶、马铃薯[25]。碰撞恢复系数e计算式为



(a)测量装置　　(b)碰撞反弹高度测量

图10　碰撞恢复系数测量

Fig. 10　Measurement of collision recovery coefficient

$$e = \sqrt{\frac{H_u}{300}} \tag{11}$$

经计算马铃薯与Q235钢(表面红漆)、丁腈橡胶、马铃薯的碰撞恢复系数分别为0.71、0.55、0.43；结合实际作业情况，马铃薯与吨包袋碰撞过程后不发生反弹，因此，在仿真试验中取马铃薯与吨包袋的碰撞恢复系数为0.01。

采用斜面滑动法测量马铃薯静摩擦因数[26]。将所需测量的材料置于静摩擦斜面装置上(图11)，并将马铃薯置于材料上方，匀速倾斜装置，当马铃薯出现滑移趋势时，试验结束，记录此时角度为θ_f，则马铃薯与摩擦面材料的静摩擦因数μ_s与角度θ_f的关系式满足$\mu_s = \tan\theta_f$。

马铃薯滚动摩擦因数采用斜面滚动法和能量守恒定律相结合的方式测定[27]。首先将马铃薯放置在倾斜角度为θ_k的斜面上，使马铃薯以无初速度从斜面上滚



(a) 静摩擦因数　　(b) 滚动摩擦因数

图11　摩擦因数测量

Fig. 11　Friction coefficient measurement

下，斜面上方与水平面上放置相同的材料。马铃薯在摩擦力的作用下最终停止在平面上的某一处，测量马铃薯在斜面上滚动距离，记为S_k，马铃薯在水平面上滚动的距离记为L_k。

根据能量守恒定律，马铃薯的势能转化为滚动摩擦力做功，此时马铃薯滚动摩擦因数μ_k计算式为

$$\mu_k = \frac{S_k \sin\theta_k}{S_k \cos\theta_k + L_k} \tag{12}$$

摩擦因数测量时表面材料选取Q235钢(表面红漆)、丁腈橡胶、吨包袋与马铃薯表皮。每组试验重复10次，取平均值，试验结果如表2所示。

表2　摩擦因数测量

Tab. 2　Friction coefficient measurement

参数	薯-薯	薯-Q235钢	薯-丁腈橡胶	薯-吨包袋
静摩擦因数	0.540 5	0.445 7	0.546 4	0.332 3
滚动摩擦因数	0.040 2	0.013 5	0.023 2	0.018 3

如图12所示，通过质构仪对马铃薯进行轴向及径向压缩试验，从而获取马铃薯的弹性模量、泊松比及剪切模量。

通过取样器分别从径向和轴向对马铃薯进行取样，两个方向各取10个样品。取样器为内部直径为18 mm的圆筒状，取样后统一薯块试样长度为15 mm。使用圆柱型平底探头P/36R在Stable Micro Systems质构仪上进行轴向和径向压缩试验。为确定压缩位移，保证试验的准确性，先进行预试验。将马铃薯样品放置在探头正下方，进行压缩试验，结果显示当压缩位移为6.609 mm时，达到最大压力289.255 4 N，因此设定固定压缩位移为



(a) 质构仪 (b) 薯块样品

图12 压缩试验

Fig. 12 Compression test

5.5 mm,压缩速度为0.5 mm/s,测量试样压缩前的直径、长度及压缩过程的最大直径,以试验所得数据的第一个峰值作为压缩试验的最大载荷,计算马铃薯不同方向的弹性模量、剪切模量及泊松比。计算式为

$$\begin{cases} E = \dfrac{F_{max} l}{A\Delta l} \\ \mu = \dfrac{l\Delta d_0}{d_0 \Delta l} \\ G = \dfrac{E}{2(1+\mu)} \end{cases} \tag{13}$$

式中 E——马铃薯弹性模量,MPa

F_{max}——压缩试验最大载荷,N

l——试样长度,mm

Δl——压缩位移,mm

A——试样面积,mm^2

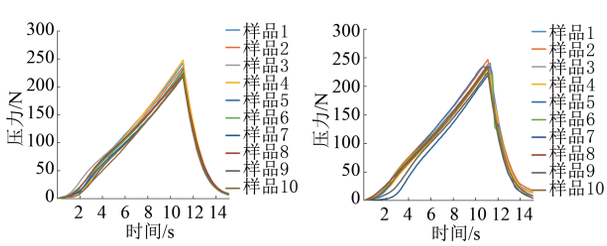
μ——马铃薯泊松比

Δd_0——试样直径变化量,mm

d_0——试样直径,mm

G——马铃薯剪切模量,MPa

试验结果如图13所示。通过计算得出马铃薯的力学参数如表3所示。



(a)轴向压缩试验 (b)径向压缩试验

图13 马铃薯压缩试验力-时间变化曲线

Fig. 13 Pressure time variation curve of potato compression test

表3 马铃薯力学参数

Tab 3 Potato mechanical parameters

项目	弹性模量/MPa	泊松比	剪切模量/MPa
轴向	2.794 6	0.326 1	1.055 3
径向	2.839 9	0.330 8	1.065 9
平均值	2.817 2	0.328 4	1.060 6

3.2 离散元模型建立

如图14所示,结合3.1节所测量的马铃薯物料特性分别建立类球形马铃薯与椭球形马铃薯并采用颗粒填充。



(a) 类球形 (b) 椭球形

图14 离散元颗粒模型

Fig.14 Discrete element particle model

颗粒模型间采用Hertz-Mindlin(no slip)接触模型,根据3.1节及文献[28-30]设定离散元材料属性参数如表4所示、相互作用参数同3.1节,其中,吨包袋的材料为PP(聚丙烯)材料。

表4 材料属性参数

Tab4 Material property parameters

参数	马铃薯	Q235钢	丁腈橡胶	聚丙烯
泊松比	0.33	0.30	0.47	0.42
密度/(kg·m^{-3})	1 065	7 850	980	920
剪切模量/MPa	1.06	78 000	2.67	537.70

3.3 模型准确性验证

在进行集薯装袋仿真前,需先验证马铃薯颗粒模型的准确性。通过堆积角试验,对比物理试验和仿真试验的堆积角,从而验证仿真模型的准确性[31]。

马铃薯堆积角物理试验在一个两端无底的箱体(长500 mm、宽500 mm、高600 mm)中装满马铃薯,下方铺一层丁腈橡胶,随后以速度8.33 mm/s提升箱体,在重力作用下,顶部马铃薯会下落并形成一个马铃薯堆,等待其静止后,利用相机拍摄马铃薯堆积的正视图像,如图15a所示,将图像导入Adobe Illustrator 2023中处理得到马铃薯的堆积角。



(a) 物理试验堆积角 (b) 仿真试验堆积角

图15 马铃薯堆积角测定对比

Fig. 15 Comparison of potato stacking angle measurement

马铃薯堆积角仿真试验如图15b所示,取相同大小的箱体,依据实际情况,在生成马铃薯颗粒时,类球形和椭球形质量各占一半,且生成的马铃薯在0.7倍与1.4倍之间随机生成。当箱体中装满马铃薯颗粒后,去除箱体底部,并将箱体同样以速度8.33 mm/s提升,导出仿真结果的正视图到Adobe Illustrator 2023进行处理,得出仿真试验所得的马铃薯堆积角。每种试验均重复10次,结果如表5所示。

经计算可得,台架试验所得的马铃薯堆积角平均值

表5　堆积角试验结果

Tab. 5　Accumulation angle test results　(°)

类别	最大值	最小值	平均值
实际值	31.45	28.18	29.40
仿真值	33.05	29.21	30.94

为29.40°，仿真试验所得的马铃薯堆积角平均值为30.94°。试验结果表明马铃薯仿真试验与物理试验的相对误差为5.23%，仿真试验所得的马铃薯堆积角与物理试验所得的堆积角相似度较高，说明该仿真模型具有一定的准确性，可用来进行马铃薯的集薯装袋仿真试验。

3.4　三维模型建立

根据所设计机构的基本功能，在Solidworks中完成集薯卸袋装置的简化模型，结合机构设计，设置不同参数的薯箱，并保证其它参数一致的情况下，将所需三维模型另存为.stp格式并导入EDEM中。

如图16所示，将简化的三维模型导入EDEM中，并赋予各个部件材料属性，其中，由于吨包袋属于柔性体无法直接在EDEM中体现，因此在吨包袋中加入一块与吨包袋底部大小相同的吨包板，设置吨包板材料为Q235钢，经过实际测量，升降料斗与集薯箱下方的最近距离为250 mm。为区分马铃薯颗粒在各个阶段的受力情况，根据集薯卸袋机构的实际作业情况，在EDEM中为各部件添加相应的运动，其中各部件的材料及运动属性如表6所示。

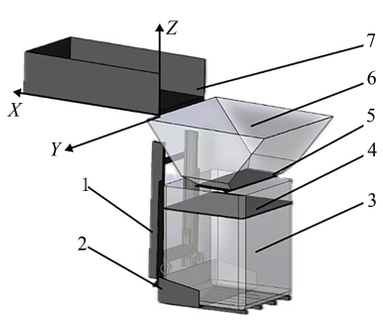


图16　简化三维模型

Fig. 16　Simplified 3D model

1. 导轨　2. 升降料斗　3. 吨包袋　4. 顿包板　5. 挡薯板　6. 集薯箱　7. 分拣输送链

表6　部件材料及运动属性

Tab. 6　Component materials and motion properties

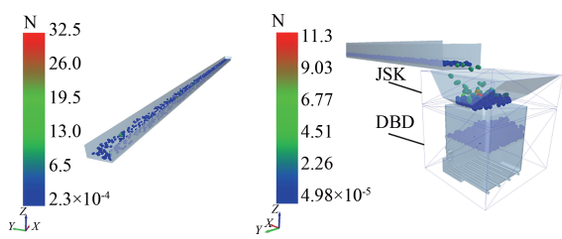
部件	材料	运动时间段/s	速度/(m•s^{-1})	运动方向
分拣输送链	丁腈橡胶	1～6 11～20	0.4～0.8	*X*−
挡薯板	丁腈橡胶	8～10	0.18	*X*+
		15～18	0.11	*X*−
吨包板	Q235钢	10～16	0.05	*Z*−
集薯箱	丁腈橡胶			
吨包袋	PP共聚物			
导轨、升降料斗	Q235钢			

依据表6中各部件速度分布情况，将整个集薯装袋过程分为5个阶段，即集薯阶段(0～8 s)、挡薯板打开阶段(8～10 s)、直接装袋阶段(10～15 s)、挡薯板关闭阶段(15～18 s)，集薯阶段(18～20 s)。

3.5　集薯装袋仿真试验方案

根据2.2节中分析所得的集薯箱结构参数及工作参数，选取分拣输送链速度为0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 m/s，集薯箱壁面角度为40°、45°、50°、55°、60°，壁面长度为560、610、660、710、760 mm设计相应的集薯箱体并进行单因素试验，为控制变量，马铃薯颗粒选用实际测量时占比较大的椭球形马铃薯并保持大小一致。

如图17a所示，试验开始前为保证马铃薯颗粒落下时的位置及方向相同，先在传送带上生成一定量的马铃薯颗粒床，设置仿真时间为1 s，生成1 000个马铃薯颗粒，将文件导出后再利用导出的文件进行新的仿真。在进行单因素试验过程中，为减小其它因素的影响，保证其它影响因素处于中间水平状态，且其它条件保持一致。如图17b所示，在仿真后处理过程中，利用“Geometry Bin”工具建立两个区域，命名为“JSX”及“DBD”，分别包裹集薯箱和吨包袋的三维模型区域，测量这两个区域的马铃薯颗粒在整个集薯装袋过程中的受力情况。在后处理过程中获取两个“Geometry Bin”中马铃薯颗粒所受最大力，仿真时间设置为20 s，按每个时间步导出试验结果。



(a) 马铃薯颗粒床　　(b) 仿真过程示意图

图17　EDEM仿真分析示意图

Fig. 17　EDEM simulation analysis schematic

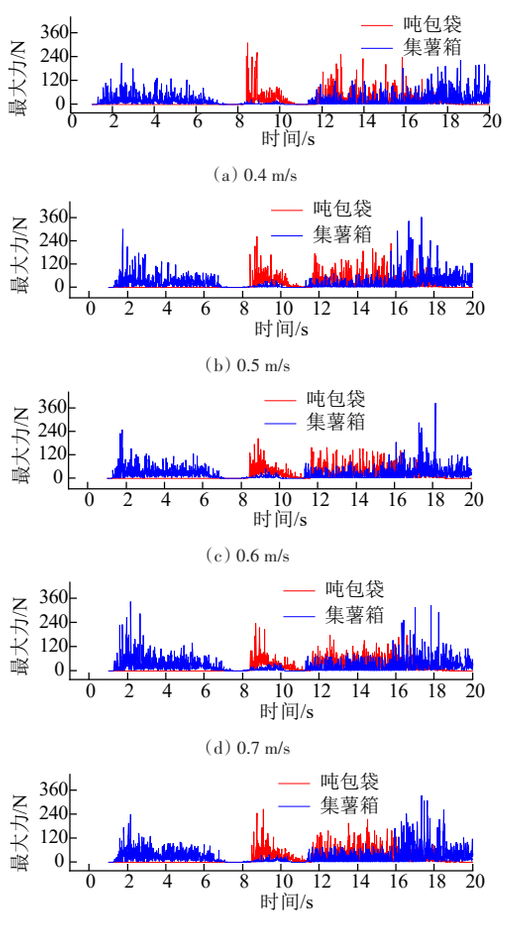
3.6　仿真试验结果与分析

通过导出的数据绘制马铃薯颗粒在仿真时间内每个时间步所受最大力的变化关系图。总体上来看，马铃薯颗粒受力情况大致相同。在集薯阶段(0～8 s)，马铃薯颗粒首先与壁面发生碰撞后再与挡薯板进行碰撞，等待集薯箱内部存有一定量的马铃薯颗粒后，则出现马铃薯颗粒之间的碰撞，此时马铃薯颗粒在每个时间点所受最大力减小，并趋于稳定。待集薯箱内马铃薯颗粒稳定后，进入挡薯板打开阶段(8～10 s)，此时马铃薯颗粒落下后与挡薯板进行碰撞，此时马铃薯颗粒受力会出现突变，且集薯箱内马铃薯颗粒受力远小于吨包袋内马铃薯颗粒受力，随着马铃薯颗粒的落入，其受力也会随之减小。待集薯箱内马铃薯颗粒完全落入吨包袋后，再次启动分拣输送链，此时仿真进入直接装袋阶段(10～15 s)，马铃薯颗粒先与集薯箱壁面碰撞再与吨包袋内的马铃薯颗粒碰撞。之后进入挡薯板关闭阶段(15～18 s)，在

挡薯板关闭过程中，下落的马铃薯颗粒与运动的挡薯板碰撞从而产生较大的力，等待挡薯板闭合后，进入二次集薯阶段（18～20 s）。通过仿真过程的慢放发现，各个阶段中马铃薯颗粒所受最大力的最大值与马铃薯颗粒碰撞时的姿态有很大关系，因此，选择各阶段的最大力平均值作为单因素试验研究的分析对象。

3.6.1 速度单因素仿真试验

选取分拣输送链速度为0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 m/s进行单因素试验，集薯箱壁面角度为50°，壁面长度为660 mm，速度单因素仿真试验结果如图18所示。由图18可知，集薯箱内马铃薯颗粒所受力的峰值主要出现在集薯阶段（0～8 s）前期及挡薯板关闭阶段（10～15 s）。集薯箱内主要分析马铃薯颗粒在集薯阶段（0～8 s）、直接装袋阶段（10～15 s）、挡薯板关闭阶段（15～18 s）及后续二次集薯阶段（18～20 s）的受力变化情况。针对于吨包袋内的马铃薯颗粒的受力情况则主要集中在挡薯板打开阶段（8～10 s）、直接装袋阶段（10～15 s）及挡薯板关闭阶段（15～18 s）。



（a）0.4 m/s　（b）0.5 m/s　（c）0.6 m/s　（d）0.7 m/s　（e）0.8 m/s

图18 不同速度下最大力变化曲线

Fig. 18 Maximum force variation curve at different speeds

通过所导出的数据，计算得出不同分拣输送链速度下，各个运动阶段中集薯箱及吨包内马铃薯颗粒所受最大力的平均值，如图19所示，图中D表示吨包袋，X表示集薯箱。

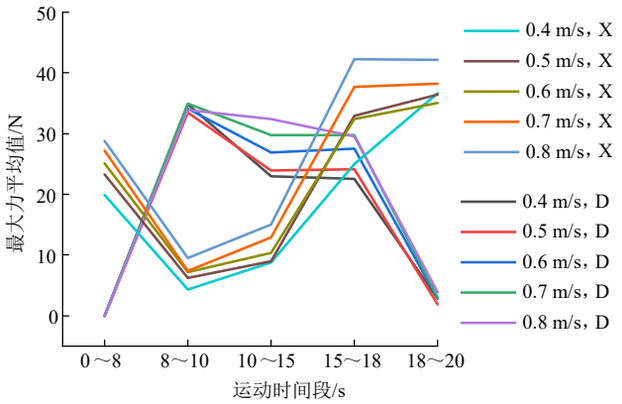


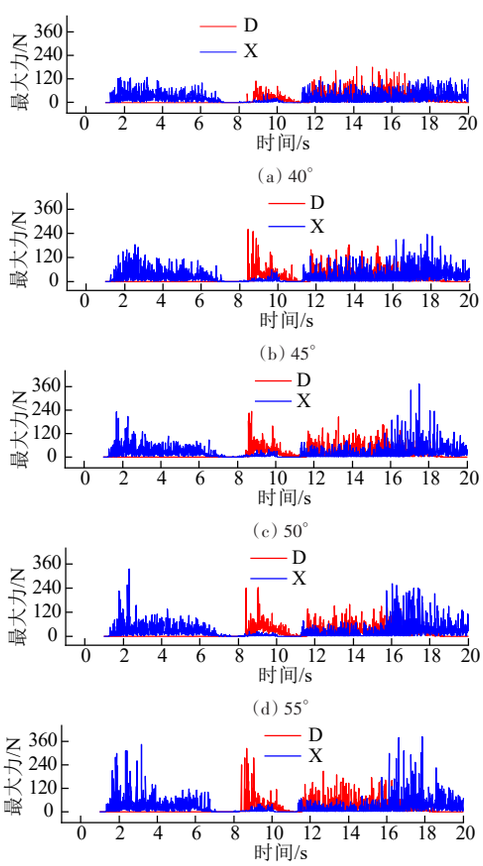
图19 不同速度下不同时间段最大力平均值变化曲线

Fig. 19 Curves of average maximum force variation at different time periods under different speeds

由图19可知，集薯箱和吨包袋内的马铃薯颗粒在各个运动时间段的受力平均值均随着分拣输送链速度的增加而增加。分析原因是随着分拣输送链速度的增加，马铃薯颗粒在碰撞时所具有的动能也随之增加，在碰撞过程中所产生的力越大。

3.6.2 角度单因素仿真试验

集薯箱壁面角度选取40°、45°、50°、55°、60°进行单因素仿真试验，分拣输送链速度为0.6 m/s，壁面长度为660 mm。试验结果如图20所示。



（a）40°　（b）45°　（c）50°　（d）55°　（e）60°

图20 不同角度下最大力变化曲线

Fig. 20 Maximum force variation curves at different angles

图 20 中集薯箱与吨包袋内颗粒受力的走向与速度单因素试验中相似。根据所得试验数据，计算得出不同集薯箱壁面角度下，各个运动阶段中集薯箱及吨包内马铃薯颗粒所受最大值平均值，如图 21 所示。

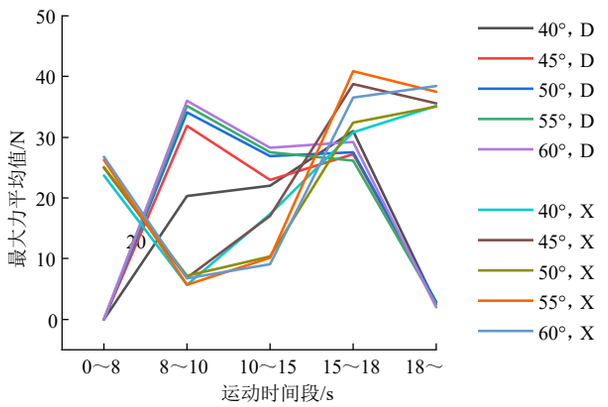


图 21　不同角度下不同运动时间段最大值平均值变化曲线

Fig. 21　Curves of average maximum force variation at different time periods under different angles

由图 21 可知，集薯阶段（0 ~ 8 s），此时集薯箱内马铃薯颗粒的受力随角度的增加而增加；挡薯板打开阶段（8 ~ 10 s），该阶段集薯箱内马铃薯颗粒受力相差不大，而吨包袋内的马铃薯颗粒受力随着角度的增加而增加；直接装袋阶段（10 ~ 15 s），集薯箱内马铃薯颗粒的受力随着角度的增加而减小，而吨包袋中马铃薯颗粒则相反，分析原因为角度较小时，马铃薯碰撞时沿垂直碰撞面的分力较大。当壁面角度增加而壁面长度不变时，此时箱体内部深度会增加，因此在落袋时的速度也会随之变大，从而造成吨包袋内马铃薯颗粒的受力增加。

挡薯板关闭阶段（15 ~ 18 s），随着角度的增加，集薯箱内马铃薯颗粒的受力经历增加、减少再增加、减少，通过对仿真图像研究发现，角度为 40°时，大部分马铃薯颗粒会在壁面上碰撞两次，第 2 次碰撞后出集薯箱时距离图 7 中的点 B 较远，因此与运动的挡薯板碰撞时间延后，并较快进入二次集薯阶段，此时力较小。

当角度达到 45°，大部分马铃薯颗粒第 2 次碰撞时距离点 B 过近，在挡薯板运动时会产生碰撞导致整个阶段的受力增加。当壁面角度大于等于 50°，此时只与壁面碰撞一次，马铃薯颗粒出集薯箱时与点 B 的距离增加，此时整个过程受力平均值又会减小。当角度达到 55°，此时出集薯箱与点 B 的距离和 50°相差不大，但是由于第 1 次碰撞点的下移，在碰撞时马铃薯颗粒的速度有所增加，此时受力平均值又会增加。当角度为 60°，此时马铃薯碰撞后出集薯箱时距离点 B 的距离增加，碰撞时间同样延后，因此受力的平均值又会再次降低，而吨包袋内受力的平均值与集薯箱内刚好相反，分析原因是马铃薯颗粒在与挡薯板碰撞后在落入袋子时的受力是减小的，因此吨包袋内马铃薯颗粒的受力平均值与挡薯板和马铃薯颗粒开始碰撞的时间有关，碰撞迟时，吨包袋内的受力平均值较大。总体来看，虽然该阶段的受力平均值为增加和降低交替出现，但是总体呈现震荡上升的趋势，即波峰和波谷随着角度的增加而增加。

结合图 20 可以看到，随着角度的增加，挡薯板关闭阶段集薯箱内受力峰值增加。而二次集薯阶段（18 ~ 20 s），吨包袋中的力均值相差不大，集薯箱内马铃薯颗粒受力均值随角度的增加而增加。

3.6.3　长度单因素仿真试验

选取集薯箱壁面长度为 560、610、660、710、760 mm 进行单因素试验，保持分拣输送链的速度为 0.6 m/s，壁面角度为 60°，试验结果如图 22 所示。

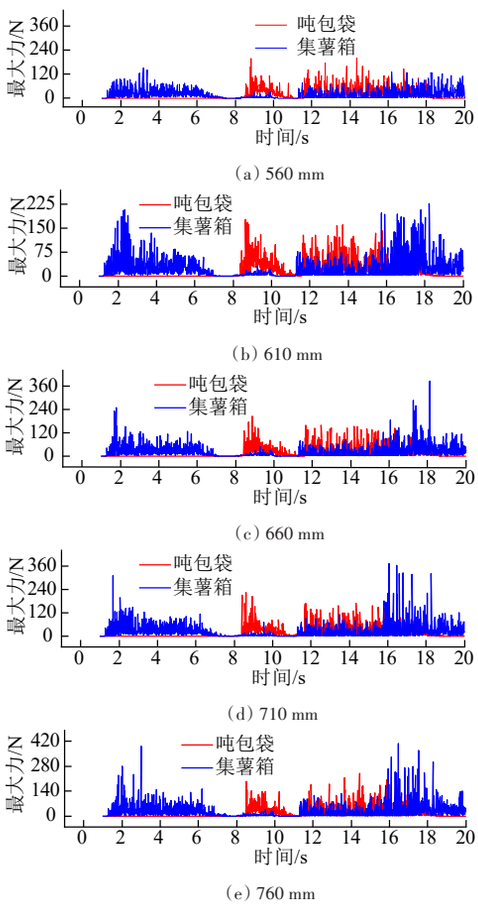


图 22　不同长度下最大力变化曲线

Fig. 22　Maximum force variation curve at different lengths

从图 22 可以看出，随着集薯箱壁面长度的增加，各阶段的力峰值也随之增加。根据所得试验数据，计算得出不同集薯箱壁面长度下，各个运动阶段中集薯箱及吨包内马铃薯颗粒所受最大值平均值，如图 23 所示。

由图 23 可知，集薯箱内马铃薯颗粒受力均值在集薯阶段、挡薯板打开阶段、挡薯板关闭及二次集薯阶段变化情况一致，均随壁面长度的增加而增加。而吨包袋内马铃薯颗粒的受力均值在直接装袋阶段和挡薯板关闭阶段随壁面长度的增加而增加，其它阶段大致相同。

如图 24 所示，将 5 种不同箱体长度放在一幅图中，可以看出，由于马铃薯颗粒的下落轨迹固定，则随着箱

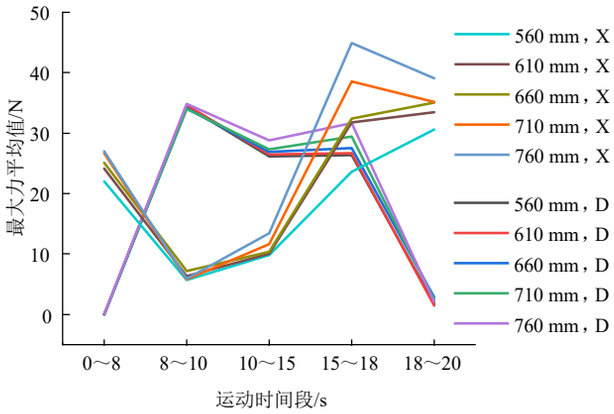


图23 不同长度下不同运动时间段最大值平均值变化曲线

Fig. 23 Curves of average maximum force variation at different time periods under different lengths

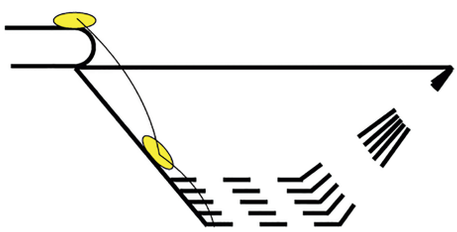


图24 长度-碰撞反弹示意图

Fig. 24 Length-impact rebound diagram

体长度的增加，马铃薯颗粒的下落高度增加，且距离左侧出料口越近，从而导致集薯箱和吨包袋内的马铃薯颗粒的受力平均值会随壁面长度的增加而增加。

结合图18、20、22可知，马铃薯颗粒在挡薯板关闭阶段会产生较大的力，因此，在挡薯板关闭时，停止分拣输送链从而降低马铃薯在集薯装袋过程中产生的损伤。为防止分拣输送链上的马铃薯堆积，在挑选平移液压缸时，应在保证可靠的前提下，提高平移液压缸速度，降低挡薯板关闭时间。

3.7 工作顺序仿真对比试验

取各试验因素为中间水平，在其它仿真条件设置相同的情况下对比先集薯后装袋和先装袋后集薯顺序下马铃薯颗粒的受力情况，且挡薯板打开时，选择停止分拣输送链，各部件运动设置如表7所示。其中，挡薯板运动方向为$X+$、运动时间为5~7 s时，对应先集薯后装袋顺序即挡薯板由关闭状态变为打开状态；调整挡薯板为打开状态后，设置其运动方向为$X-$、运动时间为5~8 s时，对应先装袋后集薯顺序即挡薯板由打开状态变为关闭状态。

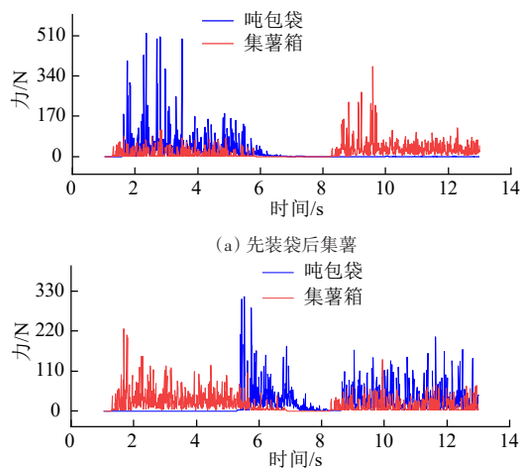
每组试验重复5次，结果取平均值，试验结果如图25所示。

从图25可以看出，先集薯后装袋的力峰值明显小于先装袋后集薯的力峰值。文献[16-18]指出当马铃薯受到的碰撞力大于等于200 N时，马铃薯会出现伤薯的现象，因此将200 N视为临界值，超出200 N时视为伤薯，因此在后处理过程中统计受力超过200 N的马铃薯个数

表7 部件运动属性

Tab. 7 Component motion attributes

部件	运动时间段/s	速度/(m•s^{-1})	运动方向
分拣输送链	0~5	0.6	
	5~8	0	$X-$
	8~13	0.6	
挡薯板	5~7	0.18	$X+$
	5~8	0.11	$X-$
吨包板	10~13	0.05	$Z-$



(a) 先装袋后集薯

(b) 先集薯后装袋

图25 工作顺序受力图

Fig. 25 Work sequence diagram

(剔除同一马铃薯在不同时间步的多次计算)并计算占马铃薯总数量的百分比，视为伤薯率。试验结果为先集薯后装袋的伤薯率为1.07%，先装袋后集薯的伤薯率为3.04%。综上所述，在收获机实际作业过程中，选择先集薯后装袋工序。

4 田间试验验证

如图26所示，为验证仿真所得机构工作顺序的正确性，选择3个因素均为中间水平时进行试验，将所设计的箱体搭载在马铃薯收获机上，选择先装袋后集薯及在挡薯板关闭阶段分拣输送链停止工作为试验组1，选择先集薯后打开挡薯板并在挡薯板关闭阶段时停止分拣输送链为试验组2，进行试验对比。每组试验重复3次，对结果取平均值。试验结果如表8所示。整机作业的伤薯率Y_S计算式为

$$Y_S = \frac{M_S}{M_0} \times 100\% \tag{14}$$

式中 M_S——吨包袋内伤薯质量，kg

M_0——吨包袋内薯块总质量，kg

由试验结果可知，试验组1伤薯率平均值为3.71%，试验组2伤薯率平均值为2.59%。通过对比试验结果可以看出，集薯卸袋装置工作顺序的改变可以降低马铃薯收获机伤薯率。


(a) 整机


(b) 装置作业

图 26　试验验证

Fig. 26　Experimental verification

表 8　试验验证结果

Tab. 8　Experimental verification result　%

组别	第 1 次试验	第 2 次试验	第 3 次试验	平均值
试验组 1	3.63	3.81	3.69	3.71
试验组 2	2.61	2.72	2.44	2.59

5　结论

(1)设计了马铃薯收获机集薯卸袋装置的整体结构，进行了卸袋机构、集薯机构关键部件设计和液压系统设计，分析了薯块碰撞过程中影响碰撞力和应力的影响因素，包括集薯箱箱壁与水平面的夹角和法向冲击速度，通过集薯箱的设计参数确定了因素范围。

(2)测定了马铃薯物料特性，建立了集薯装袋过程离散元仿真模型，进行了装袋过程的单因素仿真试验，并对结果进行了分析。结果表明，马铃薯在集薯阶段前期，挡薯板打开阶段及挡薯板关闭阶段会产生较大的力峰值。马铃薯颗粒在各阶段的受力平均值随分拣输送链速度和壁面长度的增加而增加，而角度对受力平均值的影响较为复杂。

(3)通过仿真确定了集薯卸袋装置的工作流程并进行了试验对比。试验结果表明，先集薯后装袋、挡薯板关闭阶段时停止分拣输送链的整机作业伤薯率为 2.59%，可以有效降低收获过程中的伤薯率。

参　考　文　献

[1]　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)

[2]　谢从华. 马铃薯产业的现状与发展[J]. 华中农业大学学报(社会科学版)，2012(1)：1－4.
XIE Conghua. Potato industry：status and development [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)，2012(1)：1－4.(in Chinese)

[3]　王虎存，赵武云，孙伟，等. 马铃薯机械化收获技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报，2023，39(14)：1－22.
WANG Hucun，ZHAO Wuyun，SUN Wei，et al. Research progress on the technology and equipment for potato mechanized harvesting [J]. Transactions of the CSAE，2023，39(14)：1－22.(in Chinese)

[4]　李紫辉，温信宇，吕金庆，等. 马铃薯种植机械化关键技术与装备研究进展分析与展望[J]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(3)：1－16.(in Chinese)

[5]　LI Yang，TANG Jianzhao，WANG Jing，et al. Diverging water-saving potential across China's potato planting regions [J]. European Journal of Agronomy，2022，134

[6]　杨德秋，汪昕，刘萌萌，等. 自走式马铃薯捡拾装袋机设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(1)：85－95.
YANG Deqiu，WANG Xin，LIU Mengmeng，et al. Design and experiment of self-propelled potato collecting and bagging machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(1)：85－95.(in Chinese)

[7]　魏忠彩，王兴欢，李学强，等. 履带自走式分拣型马铃薯收获机设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(2)：95－106.
WEI Zhongcai，WANG Xinghuan，LI Xueqiang，et al.Design and experiment of crawler self-propelled sorting type potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(2)：95－106.(in Chinese)

[8]　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)

[9]　魏忠彩，王业炜，李学强，等. 弹性揉搓式马铃薯联合收获机设计与试验[J]. 农业工程学报，2023，39(14)：60－69.
WEI Zhongcai，WANG yewei，LI Xueqiang，et al. Design and experiments of the potato combine harvester with elastic rubbing technology [J]. Transactions of the CSAE，2023，39(14)：60－69.(in Chinese)

[10]　武德勇. 马铃薯与杆条升运链碰撞损伤试验研究与参数设计[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2022.
WU Deyong. Experimental study on collision damage of rod lifting chain to potato and parameter design [D]. Yangling：Northwest A&F University，2022.(in Chinese)

[11]　高占红. 马铃薯跌落损伤及运动学特性研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2021.
GAO Zhanhong. Investigation of the dropping damage and the kinematics characteristics of potatoes [D]. Hohhot：Inner Mongolia Agricultural University，2021.(in Chinese)

[12]　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)

[13] DENG Weigang, WANG Yanlong , LIU Chenglong , et al. Frictional collision acceleration and damage of potato peel: an experimental study [J]. International Journal of Food Properties, 2021, 24(1):646 - 655.

[14] RADY M A ,SOLIMAN N S. Evaluation of mechanical damage of Lady Rosetta potato tubers using different methods [J]. Int. J. of Postharvest Technology and Innovation, 2015,5(2):125 - 148.

[15] 康璟,李涛,王蒂,等. 马铃薯收获中机械损伤的分析与思考[J]. 农业机械,2013(10):137 - 139.

[16] 魏忠彩,苏国梁,李学强,等.基于离散元的马铃薯收获机波浪形筛面参数优化与试验[J].农业机械学报,2020,51(10):109 - 122.
WEI Zongcai, SU Guoliang, LI Xueqiang, et al. Parameter optimization and test of potato harvester wavy sieve based on EDEM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(10):109 - 122. (in Chinese)

[17] 王万虎.基于离散元的马铃薯捡拾装置试验研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2017.
WANG Wanhu. Potato collecting device experimental study based on dscrete element[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)

[18] 汪昕,杨德秋,刘萌萌,等. 自走式马铃薯捡拾机捡拾装置参数优化与试验 [J]. 农业机械学报, 2023,54(增刊2):20 - 29.
WANG Xin, YANG Deqiu, LIU Mengmeng, et al. Parameter optimization and experiment of picking device of self-propelled potato collecting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.2):20 - 29. (in Chinese)

[19] 王相友,吕丹阳,任加意,等. 装袋型马铃薯联合收获机清选装置研制 [J]. 农业工程学报, 2022,38(增刊1):8 - 17.
WANG Xiangyou, LÜ Danyang, REN Jiayi, et al. Design and parameter optimization of the cleaning device for a bagged potato combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(Supp.1):8 - 17. (in Chinese)

[20] 魏忠彩,韩梦,苏国梁,等.装包卸包型马铃薯联合收获机设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2023,54(10):92 - 104.
WEI Zhongcai, HAN Meng, SU Guoliang, et al. Design and experiment of bagging and unloading potato combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(10):92 - 104. (in Chinese)

[21] 杨海波.弹性与塑性力学简明教程[M].北京: 清华大学出版社,2011.

[22] 王相友,张蒙,李学强,等. 辊式导流马铃薯定重装袋机设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2021,52(6):159 - 168.
WANG Xiangyou, ZHANG Meng, LI Xueqiang, et al. Design and test of roller-guided potato fixed weight bagging machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(6):159 - 168. (in Chinese)

[23] 曾智伟,马旭,曹秀龙,等.离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J].农业机械学报,2021,52(4):1 - 20.
ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(4):1 - 20. (in Chinese)

[24] 徐常塑.割前脱粒凹体梳齿增流式割台梳运机理研究与试验[D].哈尔滨:东北农业大学,2023.
XU Changsu. Research and experiment on the stripping mechanism of concave combs and increasing flow header for stripping prior to cutting[D].Harbin: Northeast Agricultural University,2023. (in Chinese)

[25] 张兆国,徐红伟,薛浩田,等.三七茎秆离散元参数标定与试验[J].农业机械学报,2023,54(11):61 - 70,91.
ZHANG Zhaoguo, XU Hongwei, XUE Haotian, et al. Calibration and experiment of discrete element parameters of *Panax notoginseng* stem [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(11):61 - 70,91 (in Chinese)

[26] 陈涛,衣淑娟,李衣菲,等.苜蓿现蕾期茎秆离散元模型建立与参数标定[J].农业机械学报,2023,54(5):91 - 100.
CHEN Tao, YI Shujuan, LI Yifei, et al. Establishment of discrete element model and parameter calibration of alfalfa stem in budding stage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(5):91 - 100. (in Chinese)

[27] 张宏建,韩欣,杨化伟,等.苹果颗粒离散元接触参数标定与仿真试验[J].农业工程学报,2024,40(12):66 - 76.
ZHANG Hongjian, HAN Xin, YANG Huawei, et al. Calibrating and simulating contact parameters of the discrete element for apple particles [J]. Transactions of the CSAE, 2024,40(12):66 - 76. (in Chinese)

[28] 王亮.马铃薯跌落冲击力学试验分析与研究[D].包头:内蒙古科技大学,2023.
WANG Liang. Analysis and research on the mechanical experiment of potato drop impact [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2023. (in Chinese)

[29] 章启祥.基于离散元的马铃薯碰撞问题分析与分选机关键部件研发[D].淄博:山东理工大学,2022.
ZHANG Qixiang. Analysis of potato collision problem and research and development of key components of separator based on discrete element [D].Zibo:Shandong University of Technology, 2022. (in Chinese)

[30] 杨兆然.碳纤维/聚丙烯复合材料的拉伸力学性能表征[D].北京:北京化工大学,2023.
YANG Zhaoran. Characterization of tensile properties of carbon fiber/polypropylene composites [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2023. (in Chinese)

[31] 吴孟宸,丛锦玲,闫琴,等.花生种子颗粒离散元仿真参数标定与试验[J].农业工程学报,2020,36(23):30 - 38.
WU Mengchen, CONG Jinling, YAN Qin, et al. Calibration and experiments for discrete element simulation parameters of peanut seed particles[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(23):30 - 38. (in Chinese)