

鲜莲子低损伤单颗连续送料系统设计与试验

马秋成, 孙 宁, 卢安舸*, 曹允盛, 刘 健, 田润丰, 庄白云

(湘潭大学机械工程学院, 湘潭 411105)

摘 要: 针对鲜莲子在机械去心自动送料过程中存在的堵料和机械损伤问题, 该研究提出一种采用气流辅助的鲜莲子振动送料方法, 实现向去心工位单颗连续送料。该系统通过间歇喷气与振动, 使鲜莲子有序进入出料溜槽实现连续送料; 通过控制下料管底端至输送链条滚轮顶端的间距以及下料管的开槽长度, 实现不同大小鲜莲子的单颗输送。采用离散元法对鲜莲子振动送料过程进行仿真, 分析了振动送料盘结构、振动频率对送料连续性的影响, 及不同气嘴布置位置对振动送料盘内部流场分布的影响。试验结果表明: 在相同振动频率下, 振动送料盘气嘴外侧布置的空工位率较内侧布置低, 送料连续性更好; 随着振动频率增大, 空工位率降低, 莲子损伤率增大。试验获得的最优工艺条件为: 采用圆弧 II 型振动送料盘, 气嘴布置在振动送料盘外侧, 振动频率 12 Hz。在该工艺条件下, 空工位率为 0.37%, 单颗输送率为 99.67%, 莲子损伤率为 0.2%, 满足鲜莲子加工要求。研究结果可为鲜莲子送料系统设计及优化提供理论依据。

关键词: 农业机械; 优化; 离散元法; 鲜莲子; 单颗连续送料; fluent

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.002

中图分类号: TH237.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-08-0012-09

马秋成, 孙宁, 卢安舸, 等. 鲜莲子低损伤单颗连续送料系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8): 12-20.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.002 <http://www.tcsae.org>

Ma Qiucheng, Sun Ning, Lu Ange, et al. Design and experiments of the sequential and continuous feeding system for fresh lotus seeds with low damage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(8): 12-20. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.002 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

莲子含有丰富的蛋白质、生物碱、类黄酮及维生素等营养成分^[1-3], 是一种传统的营养食品^[4]。近年来, 随着莲子产业规模的扩大, 机械化和自动化已成为莲子加工业发展的迫切需求^[5-6]。

去心是鲜莲子加工的重要工序^[7], 通常采用单颗逐个加工形式。自动送料是鲜莲子机械化去心加工过程的重要环节, 由于鲜莲子属散粒物料, 送料过程中容易堵料, 使加工过程中断。此外, 鲜莲子表面鲜嫩, 送料过程中容易造成表面损伤。因此, 实现鲜莲子低损伤单颗连续送料是鲜莲子机械化去心的关键。

围绕鲜莲子送料技术研究, 前人开展了许多工作, 肖勤^[8]提出了一种由送料转盘和固定盘构成的鲜莲子送料装置, 当送料转盘上的通孔旋转至与固定盘上的排料孔重合时, 位于送料转盘通孔中的鲜莲子经排料孔排出, 掉落至输送带上, 完成单颗送料。刘木华等^[9]提出了一种滚轮式送料装置, 送料滚轮上具有可容纳一颗莲子的凹槽, 当送料滚轮在料斗内转动时, 在重力和摩擦力作用

下, 鲜莲子进入送料凹槽内, 并随其转动进入导料槽内, 实现单颗送料。裴圣华^[10]设计了一种由送料转盘和刮板组成的鲜莲子单颗送料装置, 其转盘圆周上开有只容纳一颗鲜莲子的容莲槽, 当转盘在料斗中旋转时, 鲜莲子经容莲槽输出, 实现单颗送料。

上述研究仅考虑了如何实现单颗送料, 而未考虑如何保证送料过程的连续性。当两颗小莲子一起进料时, 送料装置上采用的固定尺寸容莲空间或排料孔容易造成堵料; 此外, 料斗中的莲子堆积在一起, 易发生架空, 使送料装置无法连续送料。另一方面, 机械式取料、送料容易造成鲜莲子损伤^[11]。

为此, 本文提出一种气流辅助振动送料的鲜莲子低损伤单颗连续送料系统, 对送料过程进行离散元分析和流场仿真, 开展试验研究振动送料盘气嘴位置、振动频率对送料连续性的影响规律, 获取送料系统整体性能, 以期对鲜莲子去心装备送料系统设计提供依据。

1 整机结构与工作原理

本文设计的鲜莲子低损伤单颗连续送料系统安装在自行研制的鲜莲子去心机^[12]上, 作为其进料部分。鲜莲子去心机还包括机架、料斗、去心系统、出料系统和控制系统等, 如图 1 所示。其中, 低损伤单颗连续送料系统用于向去心系统的加工工位逐颗送入经过摆正的鲜莲子; 去心系统采用气压去心原理, 利用空心冲针插入加工工位中的鲜莲子, 通入压缩空气实现去心。去心机整机性能如表 1 所示。

收稿日期: 2021-11-19 修订日期: 2022-03-24

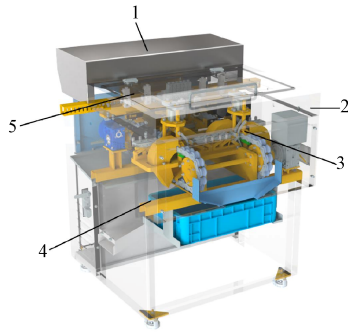
基金项目: 国家自然科学基金项目 (52175255); 湖南省自然科学基金项目 (2020JJ6036); 湘潭大学博士科研启动项目 (21QDZ07)

作者简介: 马秋成, 教授, 研究方向为农产品加工技术。

Email: mqc@xtu.edu.cn

*通信作者: 卢安舸, 博士, 讲师, 研究方向为农产品加工技术。

Email: ange.lu@xtu.edu.cn



1.料斗 2.机架 3.去心系统 4.出料系统 5.鲜莲子低损伤单颗连续送料系统
1.Hopper 2.Frame 3.Plumule removing system 4.Discharge system 5.Sequential and continuous feeding system for fresh lotus seeds with low damage

图 1 鲜莲子去心机整机结构图

Fig.1 Structure diagram of the plumule-removal machine of lotus seeds

表 1 鲜莲子去心机整机性能参数

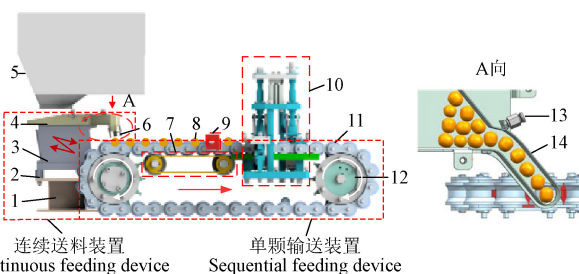
Table 1 Overall performance parameters of the plumule-removal machine

参数 Parameters	值 Values
空心冲针内径/mm	2.7
去心气压/MPa	0.7
工作周期/s	0.56
加工效率/(kg·h ⁻¹)	32.7
平均通心率/%	95.4

鲜莲子去心机采用顺次加工方式，加工过程包括进料、摆正、识别、去心、出料五个主要步骤。送料系统从料斗中连续不断地送出鲜莲子，每个工作周期向去心系统供给一颗经过摆正的鲜莲子。去心系统由端部识别装置和去心装置组成。其中，端部识别装置接收到鲜莲子后，对其端部进行颜色识别以区分头尾（鲜莲子去心有方向要求），完成端部识别的鲜莲子被送入去心加工工位。控制系统控制去心装置对鲜莲子执行去心操作。完成去心后，莲心和莲仁由出料系统分别收集。

2 关键部件设计

本文提出的鲜莲子低损伤单颗连续送料系统由连续送料装置和单颗输送装置两部分组成，如图 2 所示。



1.振动器支座 2.减振器 3.直线振动器 4.振动送料盘 5.料斗 6.下料管 7.摆正装置 8.鲜莲子 9.端部识别装置 10.去心装置 11.滚轮 12.链轮 13.搅料气嘴 14.出料溜槽
1.Vibrator support 2.Shock absorber 3.Linear vibrator 4.Vibrating feeding tray 5.Hopper 6.Feeding pipe 7.Centering device 8.Fresh lotus seed 9.End identification device 10.Plumule removing device 11.Roller 12.Sprocket 13.Mixing nozzle 14.Discharge chute

图 2 鲜莲子低损伤单颗连续送料系统

Fig.2 Sequential and continuous feeding system for fresh lotus seeds with low damage

2.1 连续送料装置

连续送料装置由振动送料盘（水平倾角为 10°）、出料溜槽、搅料气嘴、盖板、直线振动器、振动器支座等部分组成，连续送料装置通过与滚子链条配合完成莲子的送料过程，基于整机结构及前期试验获得的送料效果对振动送料盘各结构参数进行设计，如图 3 所示。

连续送料装置工作时，鲜莲子由料斗出口落入振动送料盘中，直线振动器产生振动使送料盘中的鲜莲子向前运动，进入送料盘端部的出料溜槽中。出料溜槽的宽度较窄，理论上鲜莲子将呈单列布置，依次进入可容纳多颗鲜莲子的下料管中。

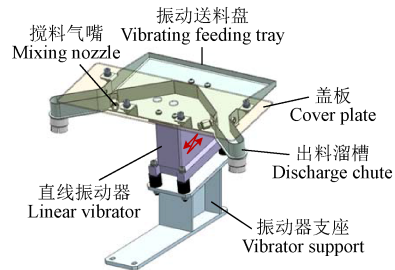


图 3 连续送料装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of the continuous feeding device

为防止两颗鲜莲子同时进入出料溜槽形成堵料，在出料溜槽入口处设有搅料气嘴（见图 3），通过向入口位置间歇喷气，推开堵塞的鲜莲子，使送料过程保持顺畅。另外，出料溜槽具有一定长度，可容纳 5~6 颗鲜莲子，形成缓冲区，即使在喷气间断期内发生堵料，也能保证送料连续。

2.2 单颗输送装置

单颗输送装置由下料管、滚子链条、链轮等部分组成，如图 4 所示。其中，滚子链条的滚轮圆周上开设有凹槽，相邻两滚子间形成可容纳一颗莲子的空间，链条输送鲜莲子依次经过各个工位。

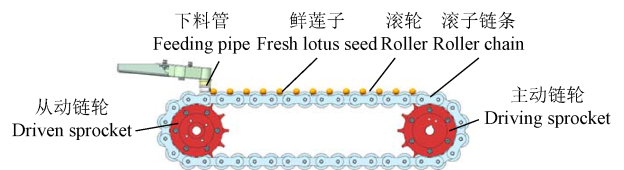
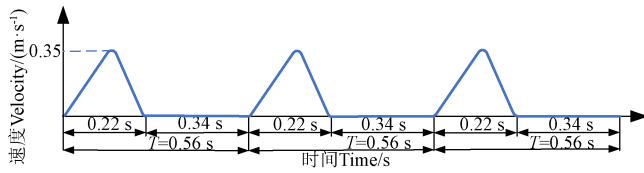


图 4 单颗输送装置结构原理图

Fig.4 Schematic diagram of the structure of the sequential feeding device

去心机工作时，步进电机驱动链条作周期性间歇移动，其运动规律如图 5 所示。相关设计参数如下：单个周期总时长为 0.56 s，分为移动和暂停两部分。其中，链条移动时间为 0.22 s，期间链条按修正梯形运动规律运动，完成对鲜莲子的输送，链条最大移动速度为 0.35 m/s，最大加速度为 2.8 m/s²，移动距离为 1 个链节（38.1 mm）。链条暂停时间为 0.34 s，暂停期间莲子端

部识别装置和去心装置分别完成对各自工位上的莲子端部检测和去心加工。



注: T 为滚子链条运动周期, s。

Note: T is the motion cycle of roller chain, s.

图 5 滚子链条运动周期

Fig.5 Roller chain movement cycle

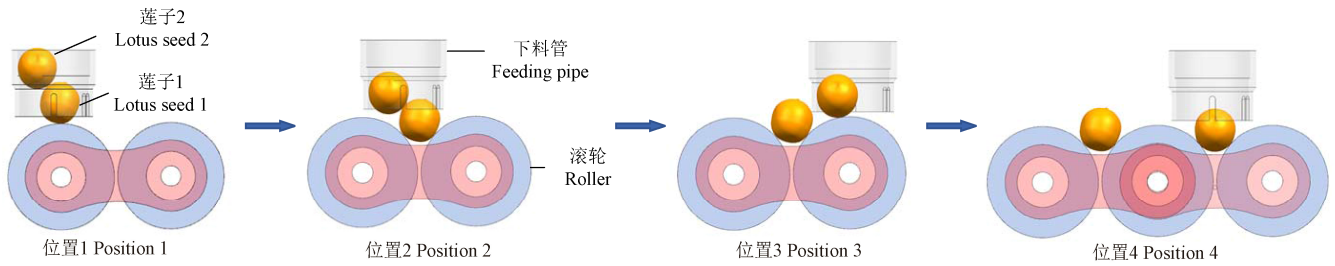


图 6 单颗输送装置工作过程示意图

Fig.6 Schematic diagram of the working process of the sequential feeding device

由上可知, 下料管是实现鲜莲子单颗输送的关键零件, 其尺寸和材料对单颗输送的稳定性和可靠性有直接影响。

当下料管底端至滚轮凹槽顶端的间距 h 过大时, 容易造成两颗小直径莲子掉落至同一个容莲空间内 (双颗莲子送料现象), 或者出现下料管出口棱边刮伤莲子的现象; 当 h 过小时, 下料管容易对直径较大莲子造成损伤, 甚至出现链条无法将莲子带出下料管的情况。

为确定合适的 h 值, 建立莲子-下料管-滚轮几何关系模型。从极端情况出发, 首先考虑两颗最小直径莲子刚好落入同一个容莲空间的情况, 其位置关系如图 7a 所示。此时下料管下沿与莲子 2 接触于点 A, 莲子 2 与滚轮接触于点 B, 且 AB 等于 13 mm (AB 等于最小鲜莲子直径, 由前期试验统计得到鲜莲子直径范围在 13~22 mm 之间), 刚好可供最小的莲子 2 掉入莲子 1 所处的容莲空间, 此时的间距 h 即为避免双颗莲子送料的理论最大间距。

当下料管底端低于莲子 2 的几何中心时, 下料管内壁与莲子 2 保持相切接触, 下料管内壁形成对莲子的推动作用, 使莲子 2 沿滚轮圆弧面滑动, 并进入到下一个容莲空间中, 在此过程中, 下料管不会对莲子表面造成损伤; 而当下料管底端高于莲子 2 的几何中心但低于图 7a 中 A 点高度时, 莲子 2 则始终与下料管底端棱边接触, 此时虽也能带动莲子沿滚轮圆弧滑动进入下一容莲凹槽, 但会对莲子表面造成损伤, 因此, h 不能大于莲子 2 中心距滚轮顶端的距离, 此时 h 为实际最大间距 (如图 7b 所示), 可由以下公式求出:

图 6 展示了单颗输送装置的工作过程, 假设初始时刻输送装置中下料管出口对准滚子顶端, 并且已有两颗鲜莲子位于下料管中 (图中位置 1), 当滚子随链条移动时 (为表示方便, 图中为下料管反向移动), 莲子 1 在重力作用下逐渐进入两滚子间的容莲空间, 并随链条前行, 此时, 位于莲子 1 上方的莲子 2 与下料管壁及莲子 1 接触 (图中位置 2)。当滚子继续向前滚动时, 莲子 2 在下料管内壁的推动下, 越过莲子 1, 并停留在后一个滚子顶部 (图中位置 3); 最后莲子 2 越过后一个滚子的圆弧面, 落入下一容莲空间中, 到达下一循环的初始状态 (图中位置 4)。

$$\begin{cases} h_{\max} = \left(\frac{D}{2} + \frac{d_{\min}}{2} \right) \cdot \sin(\beta + \gamma) - \frac{D}{2} \\ \beta = \cos^{-1} \left(\frac{L_0}{D + d_{\min}} \right) \\ \gamma = 2 \sin^{-1} \left(\frac{d_{\min}}{D + d_{\min}} \right) \\ h_{\min} = \frac{D_1}{2} - \frac{D}{2} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $d_{\min}=13$ mm; $L_0=38.1$ mm; $D=31$ mm, $D_1=37$ mm。将最小莲子直径代入公式 (1) 计算得到 h_{\max} 为 4.33 mm。

为避免干涉, 下料管底端位置不能低于滚轮轮周顶端 (如图 7c 所示), 经公式 (1) 计算得到间距最小值 h_{\min} 为 3 mm。综上, 下料管底端至滚轮凹槽顶端的间距 h 在 3~4.33 mm 范围内取值, 可以避免两颗鲜莲子进入同一容莲空间造成送料失败。本文根据鲜莲子去心机实际结构, 取 $h=3.5$ mm。

对于直径较大的莲子, 当其落入容莲空间时, 下料管底端将低于莲子的顶部而被阻挡, 为使莲子和下料管顺利脱离, 下料管材料选择弹性硅胶材料 (邵氏硬度为 50), 并在其底部开设若干矩形槽, 使得莲子可顶开下料管侧壁并滑出。开槽长度根据最大莲子直径计算, 如式 (2) 所示, 将最大莲子直径 22 mm 代入式 (2), 得到开槽长度 L 为 8 mm。

$$L = H - \sqrt{\left(\frac{D}{2} + \frac{d_{\max}}{2} \right)^2 - \left(\frac{L_0}{2} \right)^2} \quad (2)$$

最终确定下料管内径 24 mm, 壁厚 1.5 mm, 开槽长度 8 mm, 槽宽 2 mm, 槽数 3 (周向布置, 相邻槽之间夹角 60°), 下料管底端至滚轮凹槽顶端间距为 3.5 mm。

子半径的 4 倍^[21]。仿真以表征送料连续性的堵料率为评价指标。该指标通过在振动送料盘离散元模型出料溜

槽入口处设置网格箱组 (BIN GROUPS)^[22], 并统计莲子在出料溜槽入口处速度为零的时长占比。

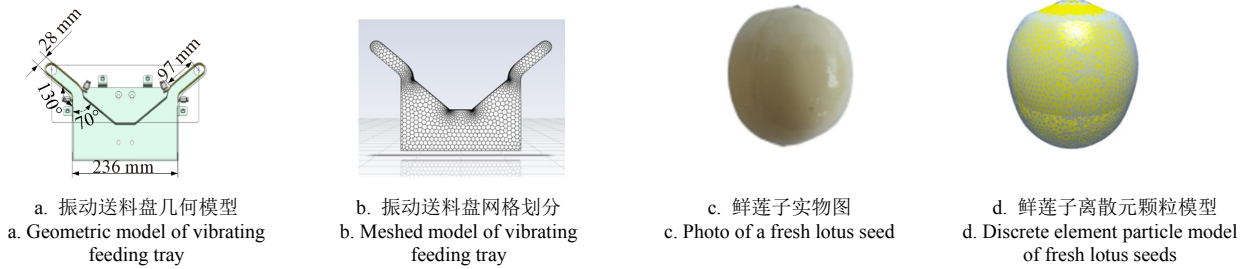


图 8 振动送料盘及鲜莲子离散元模型
Fig.8 Discrete element model of vibrating feeding tray and fresh lotus seeds

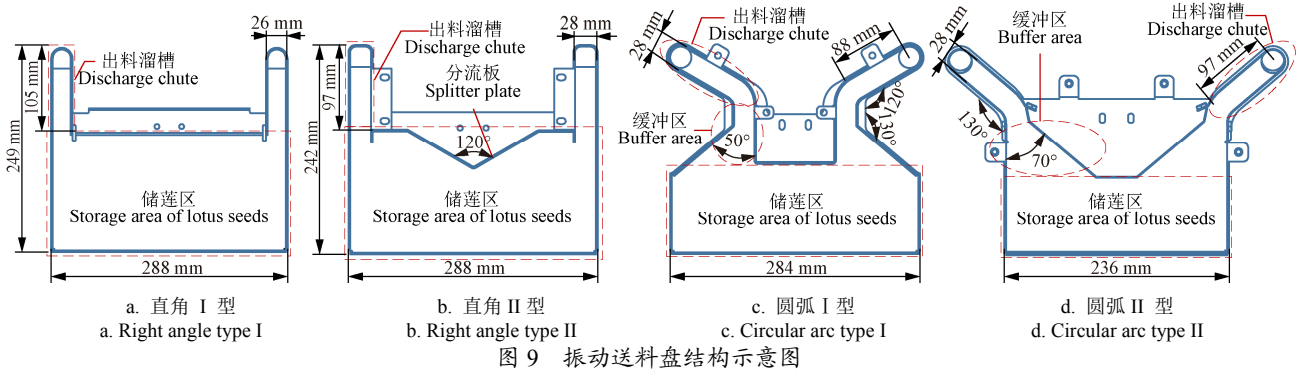


图 9 振动送料盘结构示意图
Fig.9 Structural diagram of the vibrating feeding tray

3.3 仿真结果与分析

4 种不同结构的振动送料盘在频率 10~15 Hz 范围内的堵料率仿真结果如图 10 所示。

由图 10 可知, 在相同振动频率下, 直角 I 型、直角 II 型、圆弧 I 型、圆弧 II 型的堵料率依次降低, 莲子送料流畅性依次提高。其中, 圆弧型送料盘的出料溜槽具有一定弧度, 在溜槽入口处形成可容纳多颗莲子的缓冲区域, 使得莲子受振动作用接连不断地向前运动, 因此, 相对直角型送料盘而言, 堵料现象大幅减少。圆弧 II 型送料盘较圆弧 I 型送料盘而言, 溜槽弧度小, 缓冲区域宽, 不易造成莲子堵料。而直角型送料盘的出料溜槽入口处缓冲区域窄, 容易造成莲子拥堵, 且堵住的莲子难以通过振动作用散开, 因此堵料现象严重。其中, 直角 II 型送料盘缓冲区域有所增大, 堵料率降低。

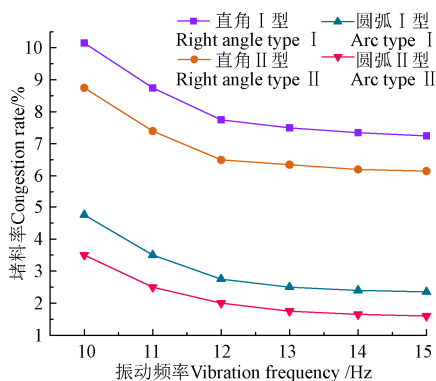


图 10 不同结构振动送料盘的堵料率随振动频率变化的仿真结果
Fig.10 Simulation results of the relationship between congestion rate and vibration frequency under different feeding tray structures

4 种结构的振动送料盘的堵料率均随振动频率的增大而降低; 但当振动频率高于 12 Hz 时, 堵料率基本趋于平缓, 提高频率对于堵料率的降低程度已不明显。另外, 即使是堵料率最低的圆弧 II 型送料盘, 其堵料率也不会降至 0, 堵料现象一直会存在。另一方面, 由于鲜莲子强度低, 当振动频率较大时, 容易造成莲子损伤, 因此在保证送料连续的前提下, 应尽可能降低振动频率; 综合考虑上述因素, 选择圆弧 II 型振动送料盘为优选送料盘, 优选振动频率为 12 Hz。

4 气流辅助搅料流场仿真分析

由离散元分析结果可知, 出料溜槽入口处的堵料现象将不可避免。为疏通堵塞莲子并防止莲子损伤, 本文提出一种气流辅助搅料方法, 利用间歇喷出的压缩空气气流将堵在出料溜槽入口处的两颗莲子中的一颗推开。基于优选的圆弧 II 型振动送料盘结构, 搅料气嘴布置方案有两种: 一是布置在出料溜槽入口处内侧, 气流推开外侧的莲子; 二是布置在外侧, 气流推开内侧的莲子。

搅料气嘴的安装位置影响振动送料盘内部搅料气体流场的分布, 从而对搅料效果产生不同影响。为此, 本文采用 FLUENT 软件对不同气嘴布置方式下的振动送料盘内部气流场进行分析, 得到最佳的气嘴安装位置, 解决堵料现象。

4.1 仿真参数设置

仿真分析区域为振动送料盘内部空间, 网格划分结果同图 8b^[23]。设置速度入口边界为 10.5 m/s, 出口边界为标准大气压条件, 其他壁面为无滑移边界条件^[24-25]。计算过程采用 SIMPLEC 压力-速度耦合算法^[26-27]。

4.2 振动送料盘气流场仿真结果

两种气嘴布置方案下的气流速度场仿真结果如图 11 所示。当气嘴布置在内侧时（见图 11a），气流沿振动送料盘外侧边缘分布并很快衰减，气流速度由 20.51 m/s 减小到 8.791 m/s，且部分气流向出料溜槽内移动，使得外侧莲子的推开动作存在不确定性。从速度迹线图可以看出，送

料盘缓冲区及出料溜槽内部气流较紊乱，不利于莲子进入溜槽。当气嘴布置在外侧时（见图 11b），气嘴喷出的气流沿分流板快速向下流动且速度均匀稳定，气流速度大小为 5.86 m/s，其方向刚好对准内侧的莲子，有助于稳定地推开内侧的莲子，且出料溜槽内部气流更均匀，有利于莲子连续送料。

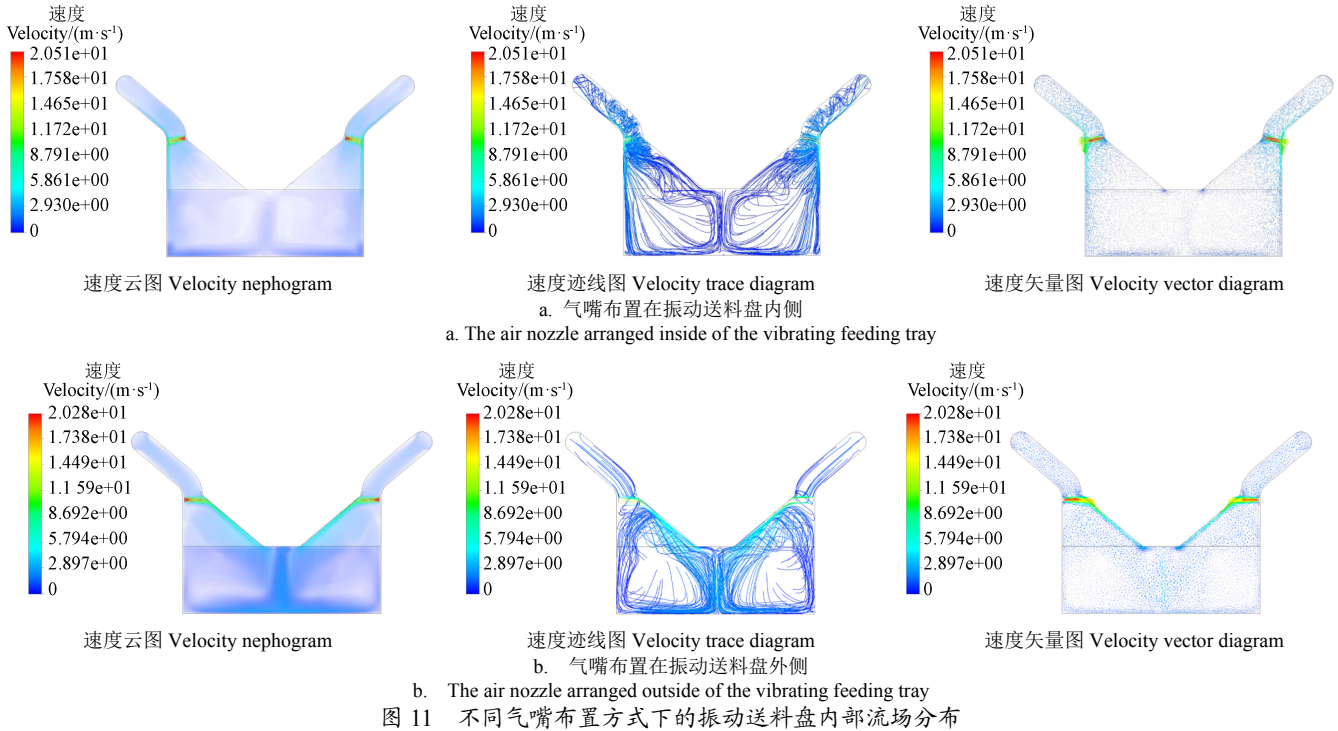


图 11 不同气嘴布置方式下的振动送料盘内部流场分布

5 单颗连续送料试验测试

5.1 试验条件及参数设置

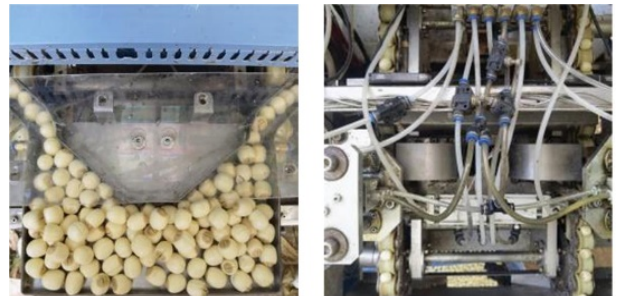
在上述研究的基础上，本文设计制造了鲜莲子低损伤单颗连续送料系统，并安装于课题组前期研制的全自动鲜莲子去心机上，开展鲜莲子单颗连续送料试验。试验样本为已经去壳、去皮且无损伤的鲜莲子（品种为太空莲 36#，产地为湖南省湘潭县白石镇），样机及试验样本本如图 12 所示。



a. 试验样机
a. Test prototype
b. 试验样本
b. Test samples

图 12 全自动鲜莲子去心机及试验样本

振动送料盘采用圆弧 II 型结构，系统喷气时间为 50 ms、喷气气压为 0.65 MPa、每输送 3 颗莲子喷气一次。气嘴布置情况与单颗连续送料试验如图 13 所示。



a. 振动送料盘内物料分布情况
a. Material distribution in the vibrating feeding tray
b. 滚子链条上单颗莲子输送情况
b. Conveying of a single lotus seed on the roller chain

图 13 单颗连续送料试验

Fig.13 Test of the sequential and continuous feeding test

5.2 试验方案与结果评价指标

单颗连续送料试验包括气嘴位置、振动频率影响试验和送料系统整体性能试验两部分。

5.2.1 气嘴位置、振动频率影响试验

首先开展分组试验，试验分 4 组进行，每组测试 250 颗鲜莲子，研究气嘴位置、振动频率对送料连续性和莲子损伤的影响。其中，气嘴位置布置于振动送料盘内侧或外侧，振动频率范围为 10~15 Hz。

5.2.2 送料系统整体性能试验

基于分组试验结果，选择优选气嘴布置方案和振动频率，对送料系统整体性能进行测试。试验分 3 组进行，

每组测试 2 000 颗鲜莲子。

5.3 评价指标

评价指标包括空工位率、单颗输送率和鲜莲子损伤率，定义如下：

空工位率指在送料过程中，滚子链条上空缺莲子的工位个数与试验样本总数的比率，用于评价送料的连续性，空工位率越低，送料连续性越好。

单颗输送率指实现单颗下料的次数与参与试验的鲜莲子总数的比率，用于评价送料系统单颗送料性能的稳定性，单颗输送率越高，系统单颗送料的稳定性越好。

鲜莲子损伤率指送料过程中出现开边和破碎的莲子数之和与试验样本鲜莲子总数的比率，用于评价振动送料过程对莲子的损伤情况，鲜莲子损伤率越低，送料连续性越好。

5.4 试验结果与分析

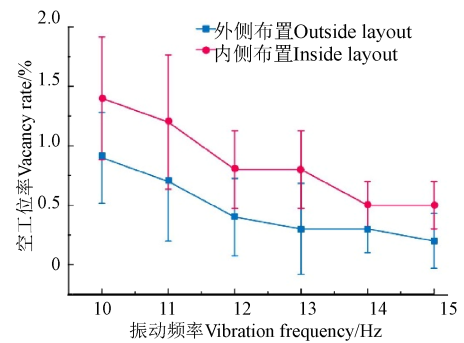
5.4.1 气嘴位置、振动频率对送料性能的影响

气嘴位置、振动频率影响试验结果如图 14 所示，由图 14 可知，不同气嘴布置方式下的空工位率与鲜莲子损伤率变化趋势基本一致。其中，气嘴外侧布置方案空工位率低于内侧，更有利于保证送料的连续性。随着振动频率的增大，空工位率逐渐降低，但鲜莲子损伤率增大，振动频率为 10 Hz 时，空工位率为 0.9%，鲜莲子损伤率为 0.1%。当振动频率增至 15 Hz 时，空工位率降低至 0.2%，但此时鲜莲子损伤率达到 0.7%。综合考虑送料连续性和鲜莲子损伤情况，选择振动频率为 12 Hz，此时，空工位率为 0.4%，鲜莲子损伤率为 0.2%。

5.4.2 送料系统整体性能试验

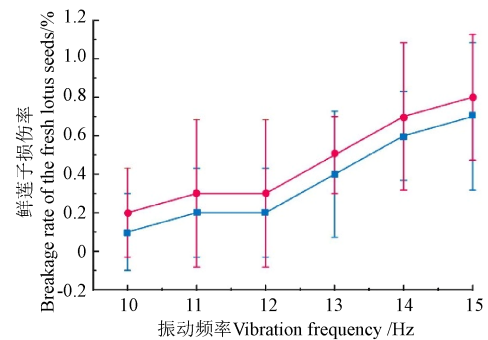
送料系统整体性能试验结果如表 3 所示，由表 3 可以看

出，优化方案的平均空工位率为 0.37%，平均单颗输送率为 99.67%，平均损伤率为 0.2%，表明所提出的鲜莲子低损伤单颗连续送料系统具有良好的送料效果，满足鲜莲子加工要求。



a. 振动频率对空工位率的影响

a. Effects of vibration frequency on vacancy rate



b. 振动频率对鲜莲子损伤率的影响

b. Effects of vibration frequency on the breakage rate of the fresh lotus seeds

图 14 不同气嘴布置方式下的空工位率和鲜莲子损伤率

Fig. 14 The vacancy rate and the breakage rate of the fresh lotus seeds under different air nozzle arrangements

表 3 全自动鲜莲子去心机性能试验结果

Table 3 Performance test results of the plumule-removal machine

试验组 Test group	样本数 Number of samples	空缺工位个数 Number of the vacant stations	堵料次数 Blocking times	莲子损伤颗数 Number of broken lotus seeds		空工位率 Vacancy rate/%	单颗输送率 Sequential delivery rate/%	鲜莲子损伤率 Breakage rate of the fresh lotus seeds/%	
				开边莲子 Half lotus seeds	破碎莲子 Broken lotus seeds				
1	2 000	7	8	2	2	0.35	99.60	0.20	
2	2 000	6	7	2	1	0.30	99.65	0.15	
3	2 000	9	5	3	2	0.45	99.75	0.25	
平均值 Average value							0.37	99.67	0.20
标准差 Standard deviation							0.08	0.08	0.05

6 结论

本文针对鲜莲子去心加工自动送料过程面临的堵料和机械损伤问题，提出了一种气流辅助搅料的鲜莲子振动送料方法，主要结论如下：

1) 设计了一种鲜莲子低损伤单颗连续送料系统，该系统由连续送料装置和单颗输送装置两部分组成。在单颗输送装置中，下料管底端至滚轮凹槽顶端的间距在 3~4.33 mm 范围内取值，可以避免两颗鲜莲子进入同一容莲空间。采用弹性硅胶作为下料管，并在其底部一侧开设矩形槽，可在防止两颗莲子送料的前提下保证大尺寸莲子正常送料。

2) 离散元仿真结果表明，在相同振动频率下，直角

I 型、直角 II 型、圆弧 I 型、圆弧 II 型振动送料盘的堵料率依次降低，送料流畅性依次提高。4 种结构的振动送料盘的堵料率均随振动频率的增大而降低，但当振动频率高于 12 Hz 时，堵料率基本趋于平缓，提高振动频率对于堵料率的降低作用已不明显。

3) 流场分析结果表明，气嘴布置在振动送料盘外侧时，气嘴喷出的气流沿分流板快速向下且速度均匀稳定，其方向刚好对准内侧的莲子，有助于稳定地推开内侧莲子，搅料效果更好，且送料溜槽内部气流更均匀，有利于莲子连续送料。

4) 鲜莲子单颗连续送料试验结果表明，在相同振动频率下，振动送料盘搅料气嘴外侧布置的空工位率较内侧布置时低，送料连续性更好；随着振动频率增大，空

工位率降低, 但鲜莲子损伤率随之增大。试验获得的既可实现单颗连续送料又能避免鲜莲子损伤的最优工艺条件为: 采用圆弧 II 型振动送料盘, 气嘴布置在振动送料盘外侧, 振动频率 12 Hz, 在该工艺条件下, 空工位率为 0.37%, 单颗输送率为 99.67%, 鲜莲子损伤率为 0.2%, 满足鲜莲子加工要求。

[参 考 文 献]

- [1] 徐谐庆, 丁为民, 张万里, 等. 鲜莲子去皮机设计与参数优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 338-349.
Xu Xieqing, Ding Weimin, Zhang Wanli, et al. Design and parameter optimization of fresh lotus seed peeler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 338-349. (in Chinese with English abstract)
- [2] Shahzad M A, Ahmad N, Ismail T, et al. Nutritional composition and quality characterization of lotus (*Nelumbo nucifera Gaertn.*) seed flour supplemented cookies[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2020(4): 1-8.
- [3] 侯群喜, 曾荣, 张国忠, 等. 不同成熟度莲籽力学特性试验[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(5): 159-166.
Hou Qunxi, Zeng Rong, Zhang Guozhong, et al. Experiment on mechanical properties of lotus seeds with different maturity[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(5): 159-166. (in Chinese with English abstract)
- [4] He J, Tao Z, Liang S, et al. Compression and shearing force on kernel rupture in shelling fresh lotus seeds[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(1): 237-242.
- [5] Abbasov E M, Agaeva N A, Imamaliyev S A. Modeling of hydrodynamics of liquid motion in complex profile pipeline[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 29(3): 467-476.
- [6] 郑宝东, 郑金贵, 曾绍校. 我国主要莲子品种营养成分的分析[J]. 营养学报, 2003, 25(2): 153-156.
Zheng Baodong, Zheng Jingui, Zeng Shaoxiao. Analysis of nutritional components of main lotus seed varieties in China[J]. Journal of Nutrition, 2003, 25(2): 153-156. (in Chinese with English abstract)
- [7] 马秋成, 卢安舸, 高连兴, 等. 莲子物料空气动力学特性与壳仁分离装置试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 297-303.
Ma Qiucheng, Lu An'ge, Gao Lianxing, et al. Aerodynamic characteristics of lotus seed material and test of shell kernel separation device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(6): 297-303. (in Chinese with English abstract)
- [8] 肖勤. 鲜莲去芯机: CN109820205A[P]. 2019-03-21.
- [9] 刘木华, 徐谐庆, 李涛, 等. 一种鲜莲子自动定心气动去芯机: CN104856192A[P]. 2015-06-01.
- [10] 裴圣华. 鲜莲子通芯机设计与研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2014.
Pei Shenghua. Design and Research of Fresh Lotus Seed Coring Machine[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [11] 肖正强, 黄勇. 莲子加工机械专利技术研究[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(17): 251-253, 258.
Xiao Zhengqiang, Huang Yong. Research on patent technology of lotus seed processing machinery[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(17): 251-253, 258. (in Chinese with English abstract)
- [12] 马秋成, 林轲强, 倪斌庆, 等. 气动自适应鲜莲子去心机 CN201910301627. 3[P]. 2019-07-23.
- [13] 郭小军, 张海东, 吴进玲, 等. 基于 EDEM 的勺轮式葵花排种器离散元仿真研究[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(2): 19-24.
Guo Xiaojun, Zhang Haidong, Wu Jinling, et al. Simulation research on spoon-type seed metering device of sunflower seed based on EDEM[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(2): 19-24. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张荣芳, 焦伟, 周纪磊, 等. 不同填充颗粒半径水稻种子离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 227-235.
Zhang Rongfang, Jiao Wei, Zhou Jilei, et al. Parameter calibration of rice seed discrete element model with different filling particle radius[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S1): 227-235. (in Chinese with English abstract)
- [15] Xu P, You Y, Wang D, et al. Optimized design of cone-hole wheel type seed metering device based on EDEM[C]. Proceedings of the 2020 ASABE Annual International Virtual Meeting, 2020. DOI:10.13031/aim.202000501
- [16] 牟家宏, 杨发展, 杨云鹏, 等. 基于流固耦合仿真水稻种子建立与参数标定[J]. 农机化研究, 2022, 44(7): 14-20.
Mou Jiahong, Yang Fazhan, Yang Yunpeng, et al. Rice seed establishment and parameter calibration based on fluid structure coupling simulation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(7): 14-20. (in Chinese with English abstract)
- [17] 侯占峰, 戴念祖, 陈智, 等. 冰草种子物性参数测定与离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 46-54.
Hou Zhanfeng, Dai Nianzu, Chen Zhi, et al. Determination of physical parameters of wheatgrass seeds and calibration of discrete element simulation parameters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(24): 46-54. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王瑞, 胡志平, 任翔, 等. 2.5D 有限元建模关键问题: 边界条件、网格划分及计算域选取[J]. 振动工程学报, 2021, 34(1): 80-88.
Wang Rui, Hu Zhiping, Ren Xiang, et al. Key problems of 2.5D finite element modeling boundary conditions, mesh generation and calculation domain selection[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(1): 80-88. (in Chinese with English abstract)
- [19] 梁诗华. 鲜莲子物料特性及其切壳机理研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
Liang Shihua. Study on Material Characteristics and Shell Cutting Mechanism of Fresh Lotus Seeds[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [20] 郝建军, 魏文波, 黄鹏程, 等. 油葵籽粒离散元参数标定与试验验证[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 36-44.
Hao Jianjun, Wei Wenbo, Huang Pengcheng, et al. Discrete element parameter calibration and experimental verification of oil sunflower seeds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 36-44. (in Chinese with English abstract)
- [21] 丁文波, 朱继平, 陈伟, 等. 基于 EDEM 的青稞接触参数仿真标定[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(9): 114-121.
Ding Wenbo, Zhu Jiping, Chen Wei, et al. Simulation and calibration of highland barley contact parameters based on edem[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(9): 114-121. (in Chinese with English abstract)
- [22] 苏佩建, 曹志刚, 亚森江·加入拉, 等. 振动给料机给料的

- EDEM 数值模拟与分析[J]. 煤矿机械, 2021, 42(10): 77-79.
Su Peijian, Cao Zhigang, Yasejiang Jiarula, et al. EDEM numerical simulation and analysis of vibrating feeder feeding[J]. Coal Mining Machinery, 2021, 42(10): 77-79. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王斌, 宫金良, 张彦斐. 基于 Fluent 的农用超声喷头内流场分析[J]. 机械工程与自动化, 2021(4): 5-7, 11.
Wang Bin, Gong Jinliang, Zhang Yanfei. Flow field analysis of agricultural ultrasonic nozzle based on fluent[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2021(4): 5-7, 11. (in Chinese with English abstract)
- [24] 马帅, 徐丽明, 牛丛, 等. 分层交错式葡萄防寒土弧形清土叶轮的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 1-9.
Ma Shuai, Xu Liming, Niu Cong, et al. Design and test of layered staggered arc soil cleaning impeller for grape cold proof soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(10): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [25] 吴科, 胡军科, 曾誉. 基于 FLUENT 的皮托管泵的内部流场数值模拟[J]. 机械工程与自动化, 2020(3): 53-55, 58.
Wu Ke, Hu Junke, Zeng Yu. Numerical simulation of internal flow field of pitot tube pump based on fluent[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2020(3): 53-55, 58. (in Chinese with English abstract)
- [26] 何川. CFD 基础及应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2015.
- [27] 祁兵, 孙旭亮, 张文毅, 等. 气力集排式精量排种器内部流场分析与试验研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(11): 1-6.
Qi Bing, Sun Xuliang, Zhang Wenyi, et al. Analysis and experimental study on internal flow field of pneumatic precision metering device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(11): 1-6. (in Chinese with English abstract)

Design and experiments of the sequential and continuous feeding system for fresh lotus seeds with low damage

Ma Qiucheng, Sun Ning, Lu Ange^{*}, Cao Yunsheng, Liu Jian, Tian Runfeng, Zhuang Ziyun

(School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: Lotus seeds have been commonly consumed as functional food and traditional Chinese herbal medicine. However, the congestion and damage often occur in the automatic feeding process of the mechanical plumule removal for fresh lotus seeds. In this study, an airflow stirring-assisted vibrating feeding system was proposed to realize the sequential and continuous feeding to the plumule-removing post. Firstly, the feeding system consisted of the linear vibrator, the vibrating feed tray, the stirring nozzles, the feeding pipes, and the roller chain. An intermittent jet and vibration were also utilized to make the lotus seeds enter the discharge chute in an orderly manner for continuous feeding. Specifically, the movement of the roller chain was combined to realize the sequential delivery of fresh lotus seeds of different sizes, particularly at the appropriate distance h between the feeding pipe and roller, and the length L of the slot set on the feeding pipe. The feeding failure was avoided by two fresh lotus seeds when entering the same station, where the distance h was in the range of 3 mm to 4.33 mm. Besides, the large-size lotus seeds were also smoothly sliding out from the feeding pipe, where the length L was 8 mm. In addition, the feeding pipe was made of elastic silica gel (Shore hardness was 50), in order to prevent the lotus seeds from mechanical damage. Secondly, the discrete element method (DEM) was used to simulate the vibrating feeding process of fresh lotus seeds. Some factors were also determined, such as the structural parameters of the vibrating feed tray, and the vibration frequency of the continuity of fresh lotus seeds feeding. The simulation results show that the congestion rate of vibrating feed trays with different structures decreased significantly, with the increase of the vibration frequency. The average congestion rate of the circular arc II vibrating feed tray was 2.06%. Once the vibration frequency was higher than 12 Hz, the congestion rate basically tended to be flat, and then the ever increasing frequency also posed no outstanding effect on the congestion rate. Therefore, the vibration frequency was reduced for better continuous feeding. Hence, the circular arc II type vibrating feed tray was selected as the preferred structure, where the optimal vibration frequency was 12 Hz. In addition, the FLUENT software was used to analyze the effect of the nozzle position on the internal flow field distribution of the vibrating feed tray. When the air nozzle was arranged on the outside, the air flow from the air nozzle quickly flowed down the splitter plate, indicating a uniform and stable speed. The direction of the airflow was exactly aligned with the lotus seeds on the inner side, which greatly contributed to pushing the lotus seeds away for better stirring. The air flow inside the discharge chute was more uniform for the better continuous feeding of the lotus seeds. Finally, the actual feeding test was carried out to clarify the effect of the nozzle position and the vibration frequency of the optimal vibrating feeder (circular arc II type vibrating feed tray) on the continuity of fresh lotus seeds feeding. The results show that the better feeding continuity was achieved when the stirring air nozzle was arranged on the outer side of the vibrating feed tray, and the vacancy rate was lower than that on the inner side. The vacancy rate decreased gradually, whereas, the breakage rate of fresh lotus seeds increased at the same time, as the vibration frequency increased. The optimal process conditions were achieved for the sequential and continuous feeding without damage to fresh lotus seeds, where the air nozzle was arranged on the outside of the vibrating feed tray, the vibration frequency was 12 Hz, the slot length of the feeding pipe was 8 mm, and the distance between the roller and the feeding pipe was 3.5 mm. Under these process conditions, the vacancy rate was 0.37%, the sequential delivery rate was 99.67%, and the breakage rate of fresh lotus seeds was 0.2%, fully meeting the requirements of lotus seed plumule-removing equipment. The findings can provide a strong reference to optimize the feeding system of fresh lotus seeds, or granular agricultural products.

Keywords: agricultural machinery; optimization; discrete element method; fresh lotus seeds; sequential and continuous feeding; fluent