

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.022

甘薯秧回收机抛送装置气固耦合模拟与试验优化

穆桂脂^{1,2} 吕皓玉¹ 张婷婷^{1,2} 郑文秀^{1,2} 张万枝^{1,2} 吕钊钦^{1,2}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

摘要:为解决甘薯秧回收机抛送功耗高的问题,同时提高抛送装置抛送性能及甘薯秧回收率,对回收机抛送装置的风机结构及工作参数进行优化设计。分析抛送装置甘薯秧动力学特性及功耗影响因素,应用 CFD-DEM 气固耦合法对抛送装置的输送过程进行数值模拟,揭示回收机内气流速度场分布和碎甘薯秧运动规律。以抛送装置比功耗、甘薯秧回收率、抛送速度为试验目标,风机转速、叶片数、叶片倾角为试验因素进行三因素三水平中心组合仿真优化试验并进行试验验证。优化试验结果表明:当风机转速为 880 r/min、叶片数为 3、叶片倾角为 7°时,抛送装置比功耗、甘薯秧回收率及抛送速度分别为 718 m²/s²、92.79%、5.96 m/s。对比试验表明抛送装置优化改进后比功耗降低 15.83%,甘薯秧回收率提高 1.75%,抛送速度提高 5.49%。

关键词:甘薯秧回收机;抛送装置;气固耦合;比功耗

中图分类号: S233.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)10-0213-10

OSID:



Gas - Solid Coupling Simulation and Experimental Optimization of Throwing Device of Sweet Potato Seedling Recycling Machine

MU Guizhi^{1,2} LÜ Haoyu¹ ZHANG Tingting^{1,2} ZHENG Wenxiu^{1,2} ZHANG Wanzhi^{1,2} LÜ Zhaoqin^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments, Taian 271018, China)

Abstract: Sweet potato seedling recycling machine can realize sweet potato seedling recycling for feeding, avoid the waste of resources. Throwing device is an important component of sweet potato seedling recycling machine. However, throwing sweet potato seedlings has high power consumption. The dynamic analysis of sweet potato seedling in the throwing device shows that the fan blade backward tilt is more conducive to throwing than forward tilt. The power consumption analysis of the throwing device shows that when the structural parameters of the fan are fixed, the specific power consumption is high as the speed is increased. The gas-solid coupling method was applied to simulate the conveying process of the throwing device. It was found that as the speed increased, the average flow velocity in the recovery machine was gradually increased. The blade number and blade inclination had a great influence on the performance of the throwing device. Then the fan speed, blade number and blade inclination angle were taken as the experiment factors, and the specific power consumption, recovery rate and throwing speed were taken as the experiment indexes, the center combination experiment with three factors and three levels was carried out. The results showed that the influence of factors on the specific power consumption from large to small were fan speed, blade inclination, blade number; the influence of factors on the recovery from large to small were fan speed, blade number and blade inclination; the influence of factors on the throwing speed from large to small were fan speed, blade number and blade inclination; when fan speed was 880 r/min, blade number was 3 and blade inclination angle was 7°, the specific power consumption of throwing device was 718 m²/s², and sweet potato seedling recovery rate was 92.79%, the throwing speed was 5.96 m/s. Comparative experiments showed that after the optimization and improvement of the throwing device, the specific power consumption was reduced by 15.83%, the recovery rate of sweet potato seedlings was increased by 1.75% and the throwing speed was increased by 5.49%.

Key words: sweet potato seedling recycling machine; throwing device; gas - solid coupling; specific power consumption

收稿日期: 2021-03-10 修回日期: 2021-04-01

基金项目: 山东省农业良种工程项目(2020LZGC00405-1)、山东省农机装备研发创新计划项目(2017YF002)、山东省现代农业产业技术体系薯类创新团队农业机械岗位专家项目(SDAIT-16-10)和山东省园艺机械与装备重点实验室项目(YYJX-2019-07)

作者简介: 穆桂脂(1982—),女,讲师,博士,主要从事农业机械化及自动化研究,E-mail: 153616196@qq.com

通信作者: 郑文秀(1981—),女,讲师,博士,主要从事农业机械化与装备研究,E-mail: wenxiu9013@163.com

0 引言

甘薯秧产量大,是良好的鲜饲料和青贮饲料。甘薯秧回收机可实现甘薯秧回收饲用,避免直接粉碎还田造成的资源浪费及病虫害的传播^[1]。抛送装置是甘薯秧回收机的重要组成部分,完成粉碎后甘薯秧的输送、提升和收集作业,但甘薯秧产量大、含水率高、柔韧性高,使抛送甘薯秧功耗很高。

国内外很多学者对气力式抛送装置的抛送机理、功耗等进行了研究^[2-3]。DENNIS^[4]首次用软件 Fluent 6.1 仿真模拟了牵引式牧草收获机内部的气流流场; LISOWSKI 等^[5]利用计算流体力学(CFD)数值模拟与试验相结合的方法研究了牧草收获机出料口内空气和碎料的运动规律;翟之平等^[6-7]采用理论分析与试验研究相结合的方法分析了叶片式秸秆抛送装置的功耗,并进行参数优化,并对抛送装置进行气固两相流模拟研究; AKHSHIK 等^[8]基于 CFD 模拟和离散元单元法(DEM)耦合,采用多球近似和滚动阻力法对非球形颗粒与颗粒间的相互作用进行了数值模拟;张锋伟等^[9]采用气固耦合法对揉丝机在不同转速下气流与物料作用过程进行了数值模拟研究;田阳等^[10]利用 CFD-DEM 气固耦合法对气力式秸秆深埋还田机输送装置进行模拟和试验研究,确定输送装置最优参数组合;辛青青^[11]采用 Fluent-EDEM 耦合的方法对马铃薯秧粉碎抛送装置进行了研究;刘鹏等^[12]基于 CFD-DEM 耦合法分析了秸秆还田机内碎秆的运动特性。这些成果没有对在降低抛送功耗的同时提高抛送装置的抛送性能及回收率等方面进行系统研究。

本文以甘薯秧回收机抛送装置作为研究对象,在对抛送装置中甘薯秧动力学分析及装置功耗分析基础上,应用 CFD-DEM 气固耦合法对抛送装置的输送过程进行数值模拟,以期揭示出回收机内气流速度分布和碎甘薯秧运动的规律。在此基础上以降低抛送装置比功耗,提高甘薯秧回收率及抛送速度为目标,采用仿真优化试验,获得回收机抛送装置的最佳结构参数和工作参数。

1 抛送装置动力学分析与功耗分析

1.1 甘薯秧回收机主要组成

仿垄形刀辊机构和抛送装置是甘薯秧回收机的主要组成机构^[13],其结构简图如图 1 所示。回收机工作时,甘薯秧被仿垄形刀辊上高速旋转的甩刀切断、粉碎后,进入风机壳内,在风机抛送作用下通过输送筒进入收集箱,实现甘薯秧回收。抛送装置主要由风机、输送筒和收集箱组成。

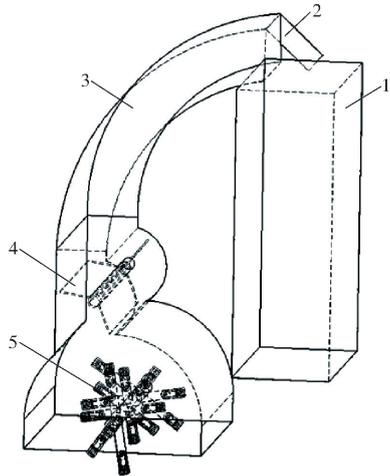


图 1 甘薯秧回收机整机结构简图

Fig. 1 Structure diagram of sweet potato seedling recycling machine

1. 收集箱 2. 出口挡板 3. 输送筒 4. 风机 5. 仿垄形刀辊

1.2 抛送装置中碎甘薯秧动力学分析

为研究碎甘薯秧在抛送装置中的运动状态,假设:进入风机后的碎甘薯秧与风机叶片的碰撞为非弹性碰撞;碎甘薯秧沿叶片方向运动初速度为零;空气阻力忽略不计。碎甘薯秧沿风机叶片运动时的质点受力及运动分析如图 2 所示。设碎甘薯秧质点为 M , O 为风机转轴的中心点, O' 为质点 M 的动坐标原点。碎甘薯秧主要受重力、离心力、摩擦阻力、叶片法向反力和哥氏力等外力作用。碎甘薯秧质点沿叶片运动的微分方程^[14-15]为

$$\frac{m d^2 l}{dt^2} = m \rho \omega_f^2 \cos \delta + mg \cos \theta - F \quad (1)$$

其中 $F = fN$ (2)

$$N = 2m\omega_f \frac{dl}{dt} + mg \sin \theta - m\rho\omega_f^2 \sin \delta \quad (3)$$

$$\theta = \alpha_0 + \alpha - \delta_0 \quad (4)$$

$$f = \tan \varphi \quad (5)$$

式中 m ——碎甘薯秧质量, kg
 l ——质点动坐标, mm
 ω_f ——风机叶片角速度, rad/s
 F ——摩擦阻力, N
 N ——叶片法向反力, N
 ρ ——质心所在位置与轴心 O 的距离, mm
 t ——时间, s
 f ——摩擦因数
 l_0 ——质点初始位置的坐标, mm
 g ——重力加速度, 取 9.8 m/s^2
 θ ——重力与叶片间夹角, ($^\circ$)
 α ——风机叶片转角, ($^\circ$)
 α_0 ——风机叶片初相位角, ($^\circ$)
 δ_0 ——叶片安装倾角, ($^\circ$)

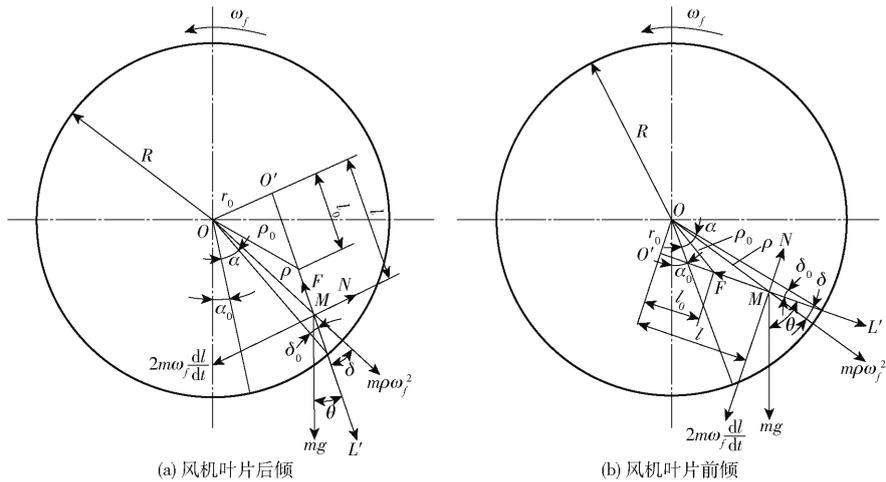


图 2 碎甘薯秧受力分析图

Fig. 2 Stress analysis diagrams of broken sweet potato seedlings

δ ——叶片安装角,叶片与径向夹角, ($^\circ$)

φ ——摩擦角, ($^\circ$)

由于 $\omega_f^2(fr_0 + l_0) \gg \frac{g}{\cos\varphi}$, 将方程(1)的解按幂

级数展开并取前两项即足够精确^[14], 可得

$$l = l_0 + \left[g \frac{\cos(\alpha_0 - \delta_0 + \varphi)}{\cos\varphi} + \omega_f^2(fr_0 + l_0) \right] \frac{t^2}{2} \quad (6)$$

式中 r_0 ——坐标原点 O 到动坐标轴的距离, m
由式(6)可得碎甘薯秧始终向外运动须满足

$$\frac{g}{\cos\varphi} + \omega_f^2(fr_0 \sin\delta_0 + l_0) > 0 \quad (7)$$

式中 R ——风机叶片端点的旋转半径, m

则对应风机最小角速度 ω_{\min} 为

$$\omega_{\min} > \sqrt{\frac{g}{(fr_0 \sin\delta_0 + l_0) \cos\varphi}} \quad (8)$$

由式(8)可知, l_0 越大 ω_{\min} 越小, 即碎甘薯秧越靠近风机叶片端部则保证它始终向外运动而被抛出的角速度越低; 叶片后倾 $\delta_0 > 0$, 后倾角越大, ω_{\min} 越小则越有利于向外抛送; 叶片前倾 $\delta_0 < 0$, 当 $fr_0 \sin\delta_0 + l_0 > 0$ 时碎甘薯秧才能抛出, δ_0 越大, ω_{\min} 越大, 因此风机叶片后倾较前倾有利于抛送。

1.3 抛送装置功耗分析

抛送装置中高速旋转的风机叶片通过击打碎甘薯秧使其获得动能, 同时使周围空气获得能量, 流动的空气进一步协助输送碎甘薯秧。抛送装置抛送碎甘薯秧消耗的总能量 E 主要包括 5 部分, 即

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 \quad (9)$$

式中 E_1 ——叶片撞击、带动碎甘薯秧耗能, J

E_2 ——碎甘薯秧沿叶片滑动时摩擦耗能, J

E_3 ——碎甘薯秧离开叶片时获得的动能, J

E_4 ——碎甘薯秧与机壳碰撞、摩擦耗能, J

E_5 ——空气获得的能量, J

(1) 叶片撞击、带动碎甘薯秧耗能

碎甘薯秧进入抛送装置后, 被风机叶片撞击、带动并加速到和风机叶片相同转速所消耗的能量为^[7]

$$E_1 = \frac{3}{2} m (\omega_f \rho_0)^2 \quad (10)$$

式中 ρ_0 ——碎甘薯秧与叶片初始碰撞处与叶轮轴心 O 的距离, mm

(2) 碎甘薯秧沿叶片滑动过程中摩擦耗能

$$E_2 = \int_{l_0}^{l_0+l_1} fNdl \quad (11)$$

将式(3)代入式(11)计算可得

$$E_2 = m\omega_f^2 fL \left[r_0 + \frac{4}{3} \sqrt{2L(l_0 - fr_0)} \right] \quad (12)$$

式中 L ——风机叶片长度, m

(3) 碎甘薯秧离开叶片时获得的动能

碎甘薯秧在滑动过程中叶片所转过的角度为

α_R , 当 $\alpha_R < \frac{\pi}{2} - \alpha_0$ 时, 有

$$E_3 = \frac{1}{2} m\omega_f^2 (R^2 - \rho_0^2) \quad (13)$$

当 $\alpha_R \geq \frac{\pi}{2} - \alpha_0$ 时, 有

$$E_3 \approx \frac{1}{2} m\omega_f^2 (R^2 - \rho_0^2) +$$

$$m\omega_f^2 [L(l_0 - fr_0) + r_0 \sqrt{2L(l_0 - fr_0)}] \quad (14)$$

(4) 碎甘薯秧与机壳碰撞、摩擦耗能

当碎甘薯秧滑移至风机叶片末端而叶片尚未到达抛出口, 碎甘薯秧就会与机壳发生碰撞及摩擦。设碰撞能耗为 E_{41} , 摩擦能耗为 E_{42} , 有

$$E_4 = E_{41} + E_{42} = m\omega_f^2 L(l_0 - fr_0) +$$

$$f m \omega_f^2 R^2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0 - \sqrt{\frac{2L}{l_0 - fr_0}} \right) \quad (15)$$

(5) 空气获得的能量

空气在抛送装置进、出口处具有的能量^[16]为

$$E_5 = \left[Q_{a1} \left(\frac{p_{a1}}{\rho} + \frac{1}{2} v_{a1}^2 \right) + Q_{a2} \left(\frac{p_{a2}}{\rho} + \frac{1}{2} v_{a2}^2 \right) \right] t \quad (16)$$

式中 Q_{a1} ——进口处气流质量流量, kg/s

Q_{a2} ——出口处气流质量流量, kg/s

p_{a1} ——进口处气流静压, Pa

p_{a2} ——出口处气流静压, Pa

v_{a1} ——进口处气流流速, m/s

v_{a2} ——出口处气流流速, m/s

ρ ——空气密度, kg/m³

(6) 抛送装置的功率及比功耗

回收机抛送装置的功率 P 为

$$P = E/t \quad (17)$$

将式(10)~(16)代入式(17)得

$$P = \frac{K m \omega_f^2 R^2 + E_5}{t} = K Q \omega_f^2 R^2 + \frac{E_5}{t} \quad (18)$$

式中 K ——耗能系数

Q ——甘薯秧喂入量, kg/s

当 $\alpha_R \geq \frac{\pi}{2} - \alpha_0$ 时

$$K = \frac{1}{2} + \frac{\rho_0^2 + L l_0 + \left(r_0 + \frac{4fL}{3} \right) \sqrt{2L(l_0 - fr_0)}}{R^2} \quad (19)$$

当 $\alpha_R < \frac{\pi}{2} - \alpha_0$ 时

$$K = \frac{1}{2} + f \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0 - \sqrt{\frac{2L}{l_0 - fr_0}} \right) + \frac{\rho_0^2 + L l_0}{R^2} + \frac{4fL \sqrt{2L(l_0 - fr_0)}}{3R^2} \quad (20)$$

由式(18)可得比功耗 P_k 为

$$P_k = P/Q = K \omega_f^2 R^2 + \frac{E_5}{Qt} \quad (21)$$

由式(21)可知,在风机结构参数(叶片长度、安装角、摩擦因数等)一定时回收机抛送装置比功耗与风机角速度的平方成正比,角速度越高比功耗越大。

2 离散元气固耦合数值模拟

2.1 碎甘薯秧离散元模型建立

将回收机收获的碎甘薯秧去除杂质后进行成分统计分析,根据叶片面积 S 将叶片分为碎叶片 ($2 \text{ cm}^2 < S \leq 5 \text{ cm}^2$) 和细碎叶片 ($S \leq 2 \text{ cm}^2$) 两类,其面积平均值分别为 2.4、1.5 cm²;根据茎秆长度 l_1 分为长茎秆 ($20 \text{ mm} < l_1 \leq 60 \text{ mm}$) 和短茎秆 ($l_1 \leq$

20 mm)。长茎秆长度、直径均值为 35.73、6.7 mm;短茎秆长度、直径均值为 14.56、4.56 mm;长茎秆、短茎秆、碎叶片及细碎叶片的质量占比分别为 20.32%、18.10%、38.24% 和 23.34%。为使构建的碎甘薯秧模型与真实碎甘薯秧成分接近,在 EDEM 中导入 SolidWorks 画出的碎甘薯秧各成分的几何模型,然后采用球形颗粒快速填充^[17-18],得到长茎秆(长 35 mm,直径 7 mm)、短茎秆(长 15 mm,直径 5 mm)、碎叶片(面积 2.4 cm²)和细碎叶片(面积 1.5 cm²)4 种颗粒,如图 3 所示。

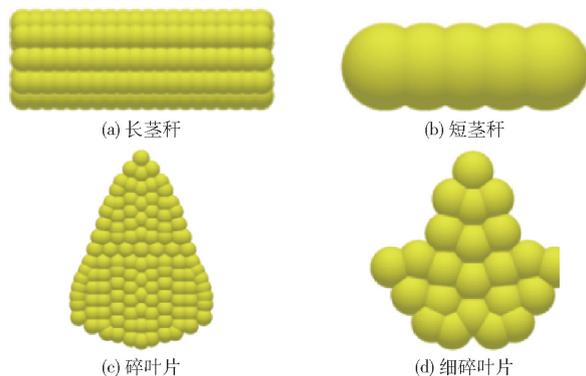


图 3 碎甘薯秧离散元模型

Fig. 3 Discrete element models of broken sweet potato seedlings

2.2 CFD-DEM 耦合分析参数设置

甘薯秧回收机仿真模型中刀辊和风机为运动部件,其余为静止部件。根据实际作业过程中薯秧进入机器的位置,在刀辊下方靠后区域添加一个虚拟 box 作为颗粒工厂,对 4 种不同颗粒分别进行颗粒工厂设置,设定颗粒工厂类型为动态工厂,不限制颗粒数量,依据实际碎甘薯秧成分占比对长茎秆、短茎秆、碎叶片、细碎叶片 4 种颗粒设置的生成速度分别为 0.33、0.29、0.62、0.38 kg/s,与实际甘薯秧喂入量 1.62 kg/s 一致。碎甘薯秧颗粒离散元参数设定如表 1 所示,颗粒间的接触模型采用 Hertz-Minglin (no slip) 模型,曳力设置选择 Freestream 曳力模型,然后导入 Fluent 软件计算出流体速度,仿真设置 rayleigh 时间步长为 $2.7 \times 10^{-5} \text{ s}$,数据存储间隔为

表 1 离散元仿真参数

Tab. 1 Discrete element simulation parameter values

参数	茎秆	叶片	装置
密度/(kg·m ⁻³)	998.91 ^a	885.36 ^a	7850 ^b
泊松比	0.28 ^a	0.35 ^c	0.30 ^b
剪切模量/MPa	6 ^a	253 ^c	70 000 ^b
碰撞恢复系数(与茎秆)	0.32 ^a	0.28 ^c	0.44 ^a
静摩擦因数(与茎秆)	0.41 ^c	0.50 ^c	0.53 ^c
滚动摩擦因数(与茎秆)	0.17 ^c	0.13 ^c	0.15 ^c

注:a 表示该数据为试验直接测定,b 表示该数据为查阅文献[19-20]获得,c 表示该数据由碎甘薯秧颗粒堆积试验标定得到。

0.01 s, 总时长设为 8 s, 网格半径尺寸为 3 倍的颗粒半径(6 mm), 总共产生 21 811 200 个网格。

2.3 风机转速对回收机内空气流动的影响

为便于分析不同风机转速时回收机内流体的速度特征, 在回收机内取 5 个具有代表性的截面 $P_1 \sim P_5$ 进行分析, 其位置如图 4 所示。截面 P_2 为回收机对称面, 与 $X-Z$ 平面平行; 截面 P_1 、 P_3 分别穿过输送筒出口左、右侧, 且与截面 P_2 平行; 截面 P_4 为输送筒出口附近位置的截面, 与 $Y-Z$ 平面平行; P_5 在粉碎刀辊上方, 平行于回收机底面, 与 $X-Y$ 平面平行。

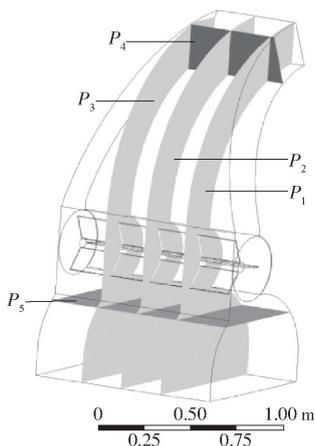


图 4 截面 $P_1 \sim P_5$ 的位置示意图

Fig. 4 Location of section $P_1 \sim P_5$

碎甘薯秧在抛送装置中受风机叶片和气流共同作用, 而非气流单独作用, 所以风机的实际转速可小于计算值 788 r/min^[13], 基于前期试验风机转速小于 1 400 r/min, 以转速 600、1 000、1 400 r/min 和叶片倾角 5° 进行仿真。3 种风机转速下各截面的速度云图如图 5 所示, 随着转速的增加, 回收机内气流平均速度逐渐增大, 对底部粉碎区域的辐射也越来越大, 但是由速度增加带来的回流现象也凸显出来。风机转速低时, 出口区域速度快且平滑均匀; 当风机转速升高时, 输送筒高速流体区域变窄, 且紧贴着上

壁面, 导致出口通道处压强变小, 小于外界大气压, 则出口底部出现一部分回流, 使出口速度反而有所下降。从出口截面 P_4 的速度分布云图(图 6a)中可看出, 上壁面位置的风速较高, 其他位置的风速不高, 可见碎甘薯秧主要从出口上端抛出。从入口截面 P_5 的速度分布云图(图 6b)中可知风机入口处风速较高, 其他部位风速分布较均匀, 易使碎甘薯秧进入风机。

2.4 碎甘薯秧颗粒群运动分析

为清晰查看不同类型的碎甘薯秧颗粒运动情况, 后处理过程中, 将长茎秆、短茎秆及叶片分别设置为绿色、紫红色及黄色。在刀辊转速 2 000 r/min、风机转速 1 000 r/min 时, 不同时刻回收机内颗粒运动情况如图 7 所示, 碎甘薯秧颗粒在粉碎刀辊作用下, 逐渐上移到达风机部位, 风机边缘处气流速度很高, 首先到达风机部位的碎甘薯秧颗粒由于空间比较大, 分散程度较好, 颗粒之间的相互作用较弱, 0.5 s 时颗粒到达收集箱上部。输送筒出口端流速很高, 碎甘薯秧颗粒在挡板的作用下改变运动方向, 在重力的作用下落入收集箱内。2.5 s 时回收机内颗粒基本稳定, 在 4.5 s 时收集箱内已堆积部分碎甘薯秧颗粒。可以看出碎甘薯秧颗粒主要紧贴粉碎室后壁和输送筒上壁面抛出, 与空气流速分布特征一致。

分析 0.5 s 时碎甘薯秧颗粒在回收机内的运动轨迹, 如图 8 所示。碎甘薯秧颗粒进入回收机粉碎室后的运动非常复杂, 这是粉碎室内气流与碎甘薯秧颗粒、碎甘薯秧颗粒间以及碎甘薯秧颗粒与回收机壁面间碰撞摩擦共同作用的结果。大部分碎甘薯秧颗粒随刀辊机构做旋转运动并从顶部粉碎室出口进入抛送装置, 其中部分碎甘薯秧颗粒与粉碎室碰撞多次后抛出, 少量从粉碎室底部流出。进入抛送装置的碎甘薯秧颗粒少部分未与风机叶片发生碰撞

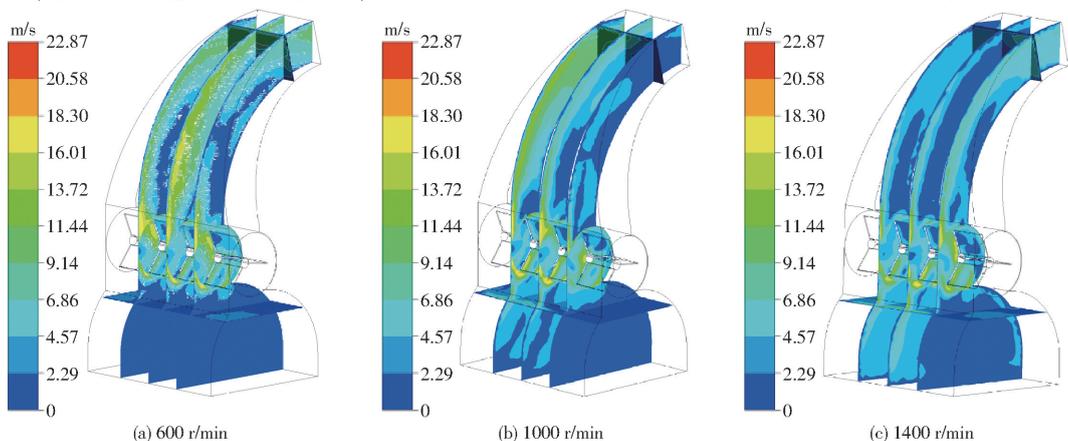


图 5 不同风机转速下各截面速度云图

Fig. 5 Velocity cloud diagrams of each section at different fan speeds

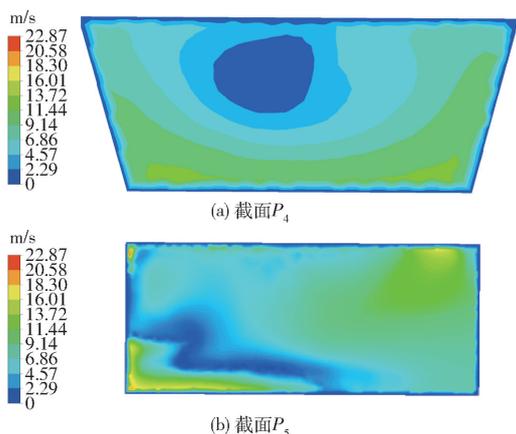


图6 风机转速1000 r/min时截面 P_4 、 P_5 速度云图

Fig. 6 Velocity cloud diagrams of section P_4 and P_5 at fan speed of 1000 r/min

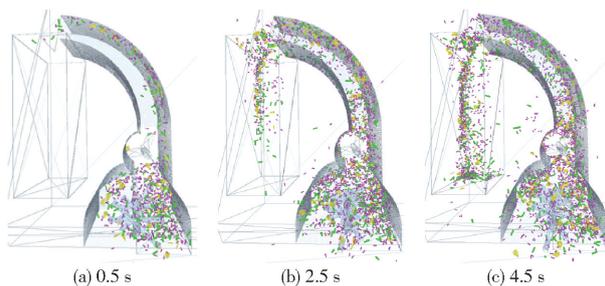


图7 回收机内不同时刻颗粒运动仿真

Fig. 7 Particle movement in reclaimer at different times

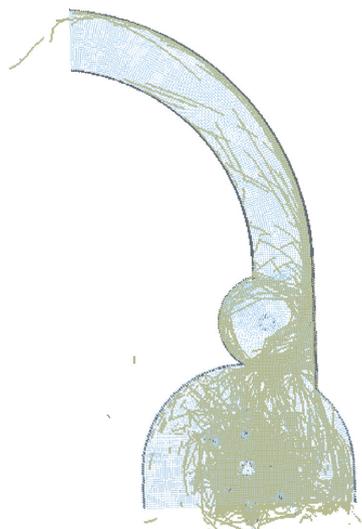


图8 0.5 s时颗粒运动轨迹

Fig. 8 Particle trajectory at 0.5 s

直接随气流向上运动;大部分在叶片的抛送作用下进入输送筒;部分随风机叶片旋转一段时间后进入输送筒。可见减少粉碎室及抛送装置内碎甘薯秧颗粒碰撞,缩短其在装置内逗留时间可提高回收机的效率。

2.5 叶片数及叶片倾角对抛送颗粒的影响

风机叶片数及叶片倾角都会影响碎甘薯秧的输送。实际应用中风机叶片数常取2、3或4,根据1.2

节分析及参考文献[6],取风机叶片数2、3、4,叶片倾角 0° 、 5° 、 10° 进行仿真。当风机转速为1000 r/min、叶片倾角为 5° 、3种风机叶片数时,碎甘薯秧颗粒数量及平均速度随时间变化的曲线如图9a和图10a所示;当风机转速为1000 r/min、叶片数为3、3种风机叶片倾角时,碎甘薯秧颗粒数量及平均速度随时间变化的曲线如图9b和图10b所示。由图9可知,随着叶片数和叶片后倾角的增加,颗粒数量都有所增加,说明输送碎甘薯秧能力增加。由图10可知,随着叶片数和叶片后倾角的增加,1 s以内颗粒平均速度增加,但随着时间延长平均速度有所下降,说明随着回收机内颗粒增加,颗粒之间碰撞加剧造成颗粒速度有所下降。

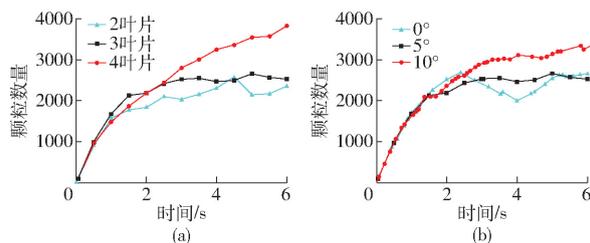


图9 颗粒数量变化曲线

Fig. 9 Changing curves of particle numbers

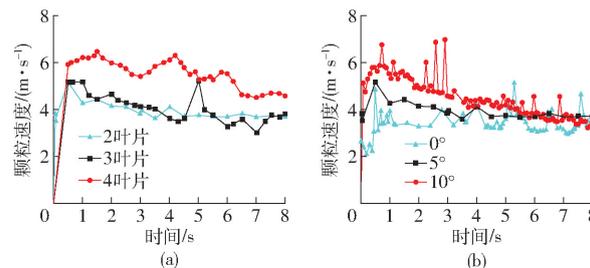


图10 颗粒速度变化曲线

Fig. 10 Changing curves of particle velocity

2.6 优化仿真试验

叶片式抛送装置的评价指标主要有功耗、抛送距离和甘薯秧回收率等。功耗主要指比功耗,可由式(21)计算。抛送距离用风机出口薯秧的平均速度表示,抛出速度越大,距离越远,速度可在 EDEM 软件后处理中求得。甘薯秧回收率等于回收质量与回收质量和流失质量之和百分比,在 EDEM 后处理模块中分别统计收集箱中碎甘薯秧颗粒总质量,为回收质量;另外统计未落入收集箱内的薯秧颗粒总质量,为流失质量。

2.6.1 回归模型建立

使用 Design-Expert 8.0 软件,利用 Box - Benhnken 的中心组合试验法,以回收机抛送装置比功耗 Y_1 、甘薯秧回收率 Y_2 、抛出速度 Y_3 为响应值,选取风机转速 x_1 、叶片倾角 x_2 、叶片数 x_3 作为主要影响因素进行三因素三水平中心组合试验。试验因素

及编码如表 2 所示, 试验设计方案及响应值如表 3 所示, 表中 X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 2 仿真试验因素编码
Tab. 2 Simulation test factors codes

编码	因素		
	风机转速 x_1 /	叶片倾角 x_2 /	叶片数 x_3 /
	($r \cdot \min^{-1}$)	($^\circ$)	个
-1	600	0	2
0	1 000	5	3
1	1 400	10	4

根据表 3 中的试验数据, 建立以 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 为因变量, X_1 、 X_2 、 X_3 为自变量的响应面回归方程

$$Y_1 = 731.4 + 386X_1 - 41X_2 + 41X_3 - 17X_1X_2 - 4X_1X_3 - 0.25X_2X_3 + 156X_1^2 + 31X_2^2 - 1.3X_3^2 \quad (22)$$

$$Y_2 = 96.25 + 2.14X_1 + 0.014X_2 + 1.06X_3 - 0.35X_1X_2 - 1.44X_1X_3 + 0.17X_2X_3 - 4.53X_1^2 - 0.53X_2^2 - 0.57X_3^2 \quad (23)$$

$$Y_3 = 6.57 + 0.84X_1 + 0.062X_2 + 0.12X_3 + 0.09X_1X_2 - 0.015X_1X_3 - 0.015X_2X_3 + 0.008X_1^2 - 0.13X_2^2 - 0.28X_3^2 \quad (24)$$

表 4 回归方程方差分析

Tab. 4 Analysis of variance of regression equation

方差来源	Y_1				Y_2				Y_3			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	1.3×10^6	9	425.02	<0.000 1 **	146.75	9	49.57	<0.000 1 **	6.26	9	72.92	<0.000 1 **
X_1	1.2×10^6	1	3 429.2	<0.000 1 **	36.64	1	111.39	<0.000 1 **	5.68	1	594.87	<0.000 1 **
X_2	1.37×10^4	1	39.30	0.000 4 **	0.001 5	1	0.004 6	0.947 8	0.031	1	3.27	0.113 3
X_3	1.32×10^4	1	37.89	0.000 5 **	9.01	1	27.39	0.001 2 **	0.11	1	11.08	0.012 6 *
X_1X_2	1.1×10^3	1	3.12	0.120 4	0.49	1	1.49	0.261 8	0.032	1	3.39	0.108 0
X_1X_3	64	1	0.18	0.681 1	8.35	1	25.39	0.001 5 **	0.000 9	1	0.094	0.767 7
X_2X_3	0.25	1	0.000 7	0.979 4	0.11	1	0.34	0.577 5	0.000 9	1	0.094	0.767 7
X_1^2	1.03×10^5	1	295.63	<0.000 1 **	86.59	1	263.24	<0.000 1 **	0.000 27	1	0.028	0.871 3
X_2^2	4.1×10^3	1	11.74	0.011 *	1.17	1	3.56	0.101 2	0.069	1	7.23	0.031 2 *
X_3^2	7.39	1	0.021	0.888 3	1.38	1	4.19	0.079 8	0.33	1	34.09	0.000 6 **
残差	2.4×10^3	7			2.3	7			0.067	7		
失拟项	1.1×10^3	3	1.10	0.446 5	0.79	3	0.69	0.603 7	0.96	3	5.35	0.069 4
误差	1.3×10^3	4			1.52	4			0.24	4		
总和	1.3×10^6	16			149.05	16			13.11	16		

注: * 表示影响显著 ($0.01 < P < 0.05$); ** 表示影响极显著 ($P < 0.01$)。

小于 0.01, 表明 3 个回归模型高度显著; 3 个模型失拟项 P 值都大于 0.05, 表明回归方程 (22) ~ (24) 的拟合度高; 另外, 模型变异系数分别为 2.28、0.61、1.53, 低于 15; R^2 分别为 0.998 2、0.984 6、0.989 4, 都大于 0.8, 说明 3 个模型拟合度都很高, 可以优化分析甘薯秧回收机抛送装置的工作参数。

表 3 仿真试验设计与结果

Tab. 3 Simulation test design scheme and response value

序号	因素			Y_1 /	Y_2 / %	Y_3 /
	X_1	X_2	X_3	($m^2 \cdot s^{-2}$)		($m \cdot s^{-1}$)
1	0	-1	-1	765	94.62	6.01
2	1	-1	0	1 360	93.41	7.11
3	-1	-1	0	569	88.34	5.55
4	-1	0	1	547	91.63	5.60
5	0	0	0	745	96.56	6.62
6	0	1	-1	693	93.71	6.09
7	0	1	1	758	96.02	6.28
8	0	-1	1	829	96.26	6.26
9	1	1	0	1 240	93.34	7.49
10	-1	0	-1	441	86.47	5.33
11	1	0	1	1 320	92.93	7.20
12	-1	1	0	508	89.67	5.57
13	1	0	-1	1 230	93.55	6.99
14	0	0	0	749	95.78	6.39
15	0	0	0	719	97.05	6.56
16	0	0	0	706	96.36	6.69
17	0	0	0	738	95.51	6.57

2.6.2 试验结果与显著性分析

对 3 个模型进行方差分析, 结果如表 4 所示。分析表 4 得知, 响应面模型的显著水平 (P 值) 都远

(1) 各因素对抛送装置比功耗的影响分析

由表 4 可知, X_1 、 X_2 、 X_3 对抛送装置比功耗的影响都极显著, 影响主次顺序为: X_1 、 X_2 、 X_3 ; 从表 3 可知, 风机转速越低、后倾角适中、叶片数越少, 抛送装置比功耗越低。主要原因为: 风机转速越低消耗能量越小, 越有利于降低功耗; 叶片数越少风机转动时

消耗能量越小,同时在单位时间内与两相流接触碰撞的次数变少,功耗越小;适当的叶片后倾有利于抛送,可降低功耗。

(2) 各因素对甘薯秧回收率的影响分析

分析表4可知,3个因素对甘薯秧回收率的影响由大到小为: X_1 、 X_3 、 X_2 ; X_1 、 X_3 、 X_1X_3 、 X_1^2 对甘薯秧回收率影响都极显著。分析表3可知,转速适当提高、叶片数增加、后倾角度增大,则甘薯秧回收率越高。图11为 X_2 处于中心水平时, X_1 、 X_3 对 Y_2 影响响应面。从图中可以看出,甘薯秧回收率随着转速的增加先增加后减小,随着叶片数的增加而增加。主要原因为:提高转速增加气流速度及抛出颗粒速度,可减少内部残留回流的颗粒,但转速过高会使部分颗粒抛出速度过高,飞出收集箱,减小回收率;叶片数增加可增加叶片抛送颗粒的机率,有利于提高甘薯秧回收率。

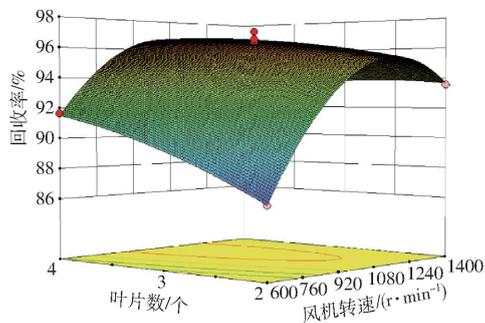


图11 X_1 、 X_3 交互作用对回收率的影响

Fig. 11 Effect of X_1 and X_3 interaction on recovery rate

(3) 各因素对抛出速度的影响分析

分析表4可知, X_1 及 X_3^2 对抛出速度的影响极显著, X_3 及 X_2^2 对抛出速度的影响显著;3个因素对抛出速度的影响由大到小为: X_1 、 X_3 、 X_2 。从表3可知,整体影响趋势是转速越高、叶片数增加,则抛出速度越高,后倾角度对抛出速度影响较小。主要原因为:提高转速增加气流速度及抛出颗粒速度;叶片数增加使颗粒抛送机率增加,可保证抛出速度。

3 参数优化与试验验证

3.1 参数优化

综上所述,风机转速对抛送装置比功耗、甘薯秧回收率及抛出速度影响显著,适当提高风机转速会增加抛出速度及甘薯秧回收率,但会增加抛送装置比功耗;抛出速度提高会增加抛送距离,但抛出速度过高会使部分颗粒飞出收集箱,不利于回收收集;叶片数增加有利于提高抛出速度及甘薯秧回收率,但会增加抛送装置比功耗;叶片倾角适中有利于提高甘薯秧回收率,降低抛送装置比功耗。为寻求甘薯秧回收机抛送装置最优工作参数及结构参数,进行

抛送装置降低比功耗、提高甘薯秧回收率及抛送速度多目标优化。利用 Design-Expert 8.0 软件的 Numerical 模块对3个指标的回归模型进行求解,设定优化函数与约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \max Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \max Y_3(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 0 \leq Y_1 \leq 800 \text{ m}^2/\text{s}^2 \\ 90\% \leq Y_2 \leq 100\% \\ 5 \text{ m/s} \leq Y_3 \leq 7.5 \text{ m/s} \\ -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (25)$$

经求解得到优化组合为:风机转速 880 r/min、叶片倾角 6.68°、风机叶片数 3.2 时,抛送装置比功耗为 630 m^2/s^2 ,甘薯秧回收率为 95.5%,抛出速度为 6.32 m/s。

3.2 试验验证

为验证仿真优化结果,利用搭建的甘薯秧回收机试验台进行验证试验,试验现场如图12所示。仿垄送秧机构与实际甘薯种植基地薯垄尺寸一致,甘薯秧为山东农业大学甘薯种植基地甘薯收获期整株甘薯秧,含水率为 78.3%,模拟田间甘薯秧生长密度,铺设密度为 3 kg/m^2 ,幅宽 0.9 m,当送秧速度为 0.6 m/s 时,甘薯秧喂入量 $Q = 1.62 \text{ kg/s}$;为便于实际应用,试验时对优化的参数理论值进行圆整,设置风机转速为 880 r/min,叶片数为 3,叶片倾角为 7°,其他参数与仿真试验参数一致。



图12 甘薯秧回收机抛送性能试验

Fig. 12 Test site of throwing performance of sweet potato seedling recycling machine

1. 仿垄送秧机构
2. 甘薯秧
3. 电动机调速器
4. 驱动电机1
5. 动态扭矩传感器1
6. 输送筒
7. 风机转轴
8. 驱动电机2
9. 动态扭矩传感器2
10. 计算机
11. 数据采集卡

(1) 抛送装置比功耗

风机、刀辊分别由驱动电机1、2驱动,电机调速

器调整风机及刀辊转速到达设定值,动态扭矩传感器 1 测量风机功率 P ,代入式(21)可计算得到比功耗。

(2) 甘薯秧回收率

每次试验前测量送入甘薯秧质量 M_1 ,试验结束后测量收集箱内甘薯秧总质量 M_2 ,计算甘薯秧回收率

$$Y_2 = M_2 / M_1 \times 100\% \quad (26)$$

(3) 抛出速度

为便于观测抛出速度,将输送筒前挡板及侧挡板更换为透明亚克力板,采用 VEO410L 型高速摄像机拍摄甘薯秧离开风机叶片的情况,摄像机位置及高速摄影结果如图 13 所示,利用 PCC 图像分析软件采用“两点法”测量甘薯秧的运动速度。选取某一甘薯秧的一个特征点(如图 13b 所示),点击播放至薯秧运动一小段距离后暂停,再点击同一特征点即可分析得到甘薯秧的速度参数。

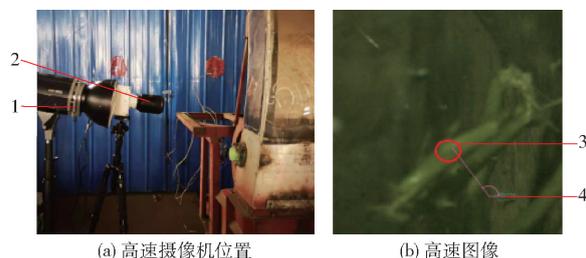


图 13 高速摄影试验

Fig. 13 High speed photography test

1. 光源 2. 高速摄像机 3. 甘薯秧特征点 4. 特征点初始位置

试验结果如表 5 所示,由表 5 可知实际试验值与仿真优化值之间相对误差均小于 8%,验证了仿真优化试验的可靠性。回收机抛送装置结构参数可

表 5 验证性试验结果

Tab. 5 Measured results

序号	$Y_1 / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2})$	$Y_2 / \%$	$Y_3 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	733	92.76	5.78
2	698	92.98	5.91
3	754	92.77	6.14
4	692	93.14	5.95
5	712	92.32	6.01
试验平均值	718	92.79	5.96
预测值	668	95.50	6.30
相对误差/ $\%$	7.48	2.71	5.40

定为 3 叶片、叶片后倾 7° 、风机转速 880 r/min。

3.3 优化前后对比试验及结果分析

为了对比分析优化前后甘薯秧回收机抛送性能,在相同试验条件下对回收机原抛送装置的比功耗、甘薯秧回收率及抛出速度进行试验,试验 3 次取平均值,原抛送装置比功耗、甘薯秧回收率及抛送速度分别为 $853 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、91.19% 及 5.65 m/s。对比优化后试验结果可以看出,抛送装置优化改进后有效降低了比功耗,降低幅度达到 15.83%,同时甘薯秧回收率及抛送速度分别提高了 1.75% 和 5.49%,实现了降低抛送装置功耗、提高抛送装置性能的目的。

4 结论

(1) 对抛送装置中甘薯秧动力学分析得出风机叶片后倾较前倾更利于抛送;对抛送装置功耗分析得出,在风机结构参数一定时,转速越高比功耗越大。

(2) 应用 CFD-DEM 气固耦合法对抛送装置的输送过程进行数值模拟得出,随着转速的增加,回收机内平均流速逐渐增大,输送筒上壁面位置的风速较高,甘薯秧颗粒主要沿上壁面进入收集箱;风机叶片数及叶片倾角对抛送装置性能影响较大。

(3) 设计三因素三水平中心组合仿真试验,建立了以风机转速、叶片数、叶片倾角为试验因素,抛送装置比功耗、甘薯秧回收率、抛出速度为试验指标的二次回归模型,得到各因素对试验指标的影响作用。抛送装置比功耗影响由大到小为:风机转速、叶片倾角、叶片数;甘薯秧回收率影响由大到小为:风机转速、叶片数、叶片倾角;抛送速度影响由大到小为:风机转速、叶片数、叶片倾角。

(4) 对回归方程进行多目标优化,求解得到最优工作参数组合并适当圆整进行试验验证,当风机转速为 880 r/min、叶片数为 3、叶片倾角为 7° 时,抛送装置比功耗为 $718 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、甘薯秧回收率为 92.79%、抛送速度为 5.96 m/s。对比试验表明抛送装置优化改进后比功耗降幅达到 15.83%,甘薯秧回收率提高 1.75%,抛送速度提高 5.49%。

参 考 文 献

- [1] 郑文秀,吕钊钦,张万枝,等. 单行甘薯秧蔓回收机设计与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(6):1-9. ZHENG Wenxiu, LÜ Zhaoqin, ZHANG Wanzhi, et al. Design and test of single row sweet potato vine recycling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6):1-9. (in Chinese)
- [2] 陈黎卿,梁修天,曹成茂. 基于多体动力学的秸秆还田机虚拟仿真与功耗测试[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(3):106-111. CHEN Liqing, LIANG Xiutian, CAO Chengmao. Virtual simulation and test of straw counters-field based on multi-body dynamics[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3):106-111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160315&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.015. (in Chinese)
- [3] 宋学锋,戴飞,张雪坤,等. 基于 CFD-DEM 耦合的揉丝机排料装置内物料运动模拟与试验[J]. 中国农业大学学报,2017,22(5):99-107. SONG Xuefeng, DAI Fei, ZHANG Xuekun, et al. Numerical simulation based on CFD-DEM coupling method and experiment of materials movement in the discharging device of kneading machine[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(5):

- 99 - 107. (in Chinese)
- [4] DENNIS L. Determination of the air and crop flow behavior in the blowing unit and spout of a pull-type forage harvester[D]. Saskatchewan: University of Saskatchewan, 2005; 52 - 58.
- [5] LISOWSKI A, EWITEK K, KLONOWSKI J, et al. Movement of chopped material in the discharge spout of forage harvester with a flywheel chopping unit: measurements using maize and numerical simulation[J]. Biosystems Engineering, 2012, 111(4): 381 - 391.
- [6] 翟之平, 王春光. 叶片式抛送装置气流流场数值模拟与优化[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 84 - 87.
- ZHAI Zhiping, WANG Chunguang. Numerical simulation and optimization for air flow in an impeller blower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 84 - 87. (in Chinese)
- [7] 翟之平, 高搏, 杨忠义, 等. 叶片式秸秆抛送装置功耗分析与参数优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 26 - 33.
- ZHAI Zhiping, GAO Bo, YANG Zhongyi, et al. Power consumption and parameter optimization of stalk impeller blowers[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 26 - 33. (in Chinese)
- [8] AKHSHIK S, BEHZAD M, RAJABI M. Simulation of the interaction between nonspherical particles within the CFD - DEM framework via multisphere approximation and rolling resistance method[J]. Particulate Science and Technology, 2016, 34(4): 381 - 391.
- [9] 张锋伟, 宋学锋, 张雪坤, 等. 基于气固耦合的排料装置内物料运动特性数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(6): 1411 - 1418.
- ZHANG Fengwei, SONG Xuefeng, ZHANG Xuekun, et al. Numerical simulation of material movement in discharging device based on gas - solid coupling method[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(6): 1411 - 1418. (in Chinese)
- [10] 田阳, 林静, 李宝筏, 等. 气力式秸秆深埋还田机输送装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 36 - 44.
- TIAN Yang, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and test of conveying device of pneumatic straw deep burying and returning machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 36 - 44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181205&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.005. (in Chinese)
- [11] 辛青青. 基于 Fluent-EDEM 的马铃薯秧粉碎抛送装置仿真与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- XIN Qingqing. Simulation and test of potato seedling crushing and throwing device based on Fluent-EDEM [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [12] 刘鹏, 何进, 章志强, 等. 基于 CFD - DEM 的秸秆还田机碎秆运动特性分析与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 244 - 253.
- LIU Peng, HE Jin, ZHANG Zhiqiang, et al. Kinematic characteristic analysis and field test of chopped stalk in straw retention machine based on CFD - DEM coupling simulation method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 244 - 253. (in Chinese)
- [13] 穆桂脂, 辛青青, 玄冠涛, 等. 甘薯秧蔓回收机仿垄切割粉碎抛送装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 53 - 61.
- MU Guizhi, XIN Qingqing, XUAN Guantao, et al. Design and experiment of knife roller and throwing device for sweet potato vine recycling machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 53 - 61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191206&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.006. (in Chinese)
- [14] 胡瑞谦. 质点在绕水平轴等速旋转平面型叶片上运动的分析[J]. 农业机械学报, 1980, 11(4): 62 - 72.
- HU Ruiqian. The motive analysis of particle which is on the blade of plane type, the blade rotate round a horizontal axle with constant angular velocity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1980, 11(4): 62 - 72. (in Chinese)
- [15] 廖庆喜, 徐阳, 袁佳诚, 等. 油菜联合收获机切抛组合式纵轴流脱离装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 140 - 150.
- LIAO Qingxi, XU Yang, YUAN Jiacheng, et al. Design and experiment on combined cutting and throwing longitudinal axial flow threshing and separating device of rape combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 140 - 150. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190714&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.014. (in Chinese)
- [16] 李昂. 玉米原茬地免耕覆秸播种同步比例回收秸秆关键技术研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- LI Ang. Key technology research of synchronous and proportional recovery of straw with no-tillage precision seeding and straw-covering in maize stubble fields[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [17] 陶贺, 钟文琪, 金保昇. 采用多元颗粒模型对圆柱形颗粒在移动床中流动的离散单元法直接数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(17): 13 - 19.
- TAO He, ZHONG Wenqi, JIN Baosheng. Discrete element modeling of cylindrical particle flowing in the moving bed by multi-element particle model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(17): 13 - 19. (in Chinese)
- [18] 王立军, 李义博, 郑招辉, 等. 玉米收获机清选装置内杂余抛送器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 124 - 136.
- WANG Lijun, LI Yibo, ZHENG Zhaohui, et al. Design and experiment of mechanism of throwing impurity in cleaning device of maize grain harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 124 - 136. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190414&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.014. (in Chinese)
- [19] 廖宜涛, 廖庆喜, 周宇, 等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 73 - 82.
- LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 73 - 82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200608&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.008. (in Chinese)
- [20] 王万章, 刘婉茹, 袁玲合, 等. 小麦植株建模与单纵轴流物料运动仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 170 - 180.
- WANG Wanzhang, LIU Wanru, YUAN Linghe, et al. Simulation and experiment of single longitudinal axial material movement and establishment of wheat plants model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 170 - 180. (in Chinese)