doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.021

小麦植株建模与单纵轴流物料运动仿真与试验

王万章　刘婉茹　袁玲合　屈　哲　何　勋　吕严柳
（河南农业大学机电工程学院，郑州 450002）

摘要：针对单纵轴流小麦联合收获机物料输送中出现的堵塞问题，对小麦在螺旋输送器、倾斜输送器和脱粒滚筒螺旋喂入头中的输送过程进行理论分析，确定了影响小麦输送性能的主要因素及参数范围；利用 EDEM 软件建立了收获期小麦植株离散元模型，并采用 EDEM－Recurdyn 耦合的方法，构建了小麦从螺旋输送器喂入、经倾斜输送器，直至到达脱粒滚筒的输送系统仿真体系，分析了小麦在连续输送过程中的迁移规律、轴向速度和局部物料质量流率变化情况。以喂入量、螺旋输送器转速、倾斜输送器主动轴转速和脱粒滚筒转速为试验因素，以物料输送时间为试验指标，进行四因素五水平的二次正交旋转中心组合试验，结果表明：各因素对输送时间的影响由大到小依次为喂入量、脱粒滚筒转速、螺旋输送器转速、倾斜输送器主动轴转速；当喂入量为 7.52 kg/s、螺旋输送器转速为 308 r/min、倾斜输送器主动轴转速为 369 r/min、脱粒滚筒转速为 1 083 r/min 时，输送时间为 6.37 s，输送时间最短，采用高速摄影技术拍摄物料输送情况，结果表明试验与仿真模拟误差为 4.08%，验证了数值仿真结果的可靠性，为解决单纵轴流联合收获机输送系统的堵塞问题提供了理论依据。

关键词：小麦联合收获机；输送系统；物料运动；EDEM；仿真
中图分类号：S225.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2020)S2-0170-11

Simulation and Experiment of Single Longitudinal Axial Material Movement and Establishment of Wheat Plants Model

WANG Wanzhang　LIU Wanru　YUAN Linghe　QU Zhe　HE Xun　LÜ Yanliu
(*College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Henan Agricultural University*, *Zhengzhou* 450002, *China*)

Abstract: Aiming at the blockage problem in the material conveying of the single longitudinal axial flow wheat combine harvester, the conveying process of the wheat in the screw conveyor, indined conveyor and threshing drum screw feed head was theoretically analyzed, and the main factors affecting the conveying performance of wheat and the optimal parameter range were determined. The EDEM software was used to establish discrete element model of wheat plants during harvest, and the EDEM－Recurdyn coupling method was used to construct a simulation system for the conveying system of wheat from the screw conveyor, through the indined conveyor, to the threshing drum, and wheat migration law, axial velocity and local material mass flow rate changes were analyzed during continuous conveying. Then the feed quantity, screw conveyor speed, indined conveyor drive shaft speed and threshing drum speed were taken as the experiment factors, and the material conveying time was taken as the experiment index, the quadrature orthogonal rotation center combination experiment with four factors and five levels was carried out. The results showed that the influence of various factors on the conveying time from large to small were feed rate, speed of threshing drum, screw conveyor speed, and indined conveyor driving shaft speed. The results showed that when the feed rate was 7.52 kg/s, the screw conveyor speed was 308 r/min, the indined conveyor driving shaft speed was 369 r/min, and the threshing drum speed was 1 083 r/min, the conveying time was 6.37 s, and the conveying time was the shortest. Finally, the high-speed photography technology was used to verify the conveying performance. The results showed that the error between the experiment and the simulation was 4.08%, which verified the reliability of the numerical simulation results and provided a theoretical basis for solving the problem of blockage in the conveying system of the single longitudinal axial flow combine.

Key words: wheat combine harvester; conveyor system; material movement; EDEM; simulation

收稿日期：2020－08－22　修回日期：2020－09－19
基金项目：现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS－03)和国家重点研发计划项目(2018YFD030070)
作者简介：王万章(1963—)，男，教授，主要从事农业工程装备、机电一体化及信息技术应用研究，E-mail：wangwz@henau.edu.cn
通信作者：屈哲(1988—)，男，讲师，主要从事收获机械装备与技术研究，E-mail：quzhe071171@henau.edu.cn

0　引言

与横轴流相比，单纵轴流小麦联合收获机具有脱净率高、适用性强等优点[1-3]，这一技术机型得到广泛应用，但是随着喂入量的不断增大，各环节作业参数不匹配，对物料输送性能产生影响[4]，作业中堵塞问题不断显现[5]。

联合收获机作业中小麦的运动情况直接影响机器的输送效率[6-8]，相关学者对联合收获机中的物料运动进行了大量研究，文献[9]分析了脱粒分离装置内小麦轴向和切向的脱粒机理，通过电磁传感器的方法追踪物料在脱谷室内的运动过程，建立了位移和速度模型；文献[10]研究了物料从伸缩拨齿进入到脱粒滚筒喂入口的迁移轨迹，得出物料通畅喂入的伸缩拨齿最佳相位角；文献[11]采用 CFD－DEM 耦合的方法对割前摘脱稻麦联合收获机分离室内谷物的运动进行了数值模拟，得到了分离室内籽粒和短茎秆速度变化规律；文献[12－13]借助高速摄像技术观察稻谷脱粒过程和籽粒的运动情况，得到了谷物的轴向速度、切向速度随时间变化规律；文献[14－16]基于离散元原理开发 AgriDEM 软件，研究了小麦在脱粒机中的运动情况。但是，以上均在联合收获机局部零部件中进行研究，无法分析物料从螺旋输送器喂入开始，经倾斜输送器，直至到达脱粒滚筒连续输送的整个过程，用传统的研究方法很难直观地得到谷物在联合收获机输送系统中的运动轨迹。借助离散元法(Engineering discrete element method，EDEM)可以直观地观察物料在联合收获机中的运动状态[17-19]，但是目前小麦机械化收获中物料运动离散元仿真缺乏准确模型，利用 Recurdyn 软件可以实现链耙式倾斜输送器等输送部件的复杂刚体运动，通过构建小麦植株离散元模型和 EDEM－Recurdyn 耦合的数值模拟仿真体系，研究小麦从螺旋输送器喂入开始，经倾斜输送器，直至到达脱粒滚筒连续输送过程的迁移规律是解决拥堵的关键。

因此，为解决小麦机械化收获中物料运动离散元仿真缺乏准确模型问题和连续输送运动过程研究的难题，本文利用 EDEM 软件建立收获期小麦植株离散元模型，采用 EDEM－Recurdyn 耦合仿真方法，分析小麦从螺旋输送器喂入、经倾斜输送器，直至到达脱粒滚筒中的运动情况，找出影响输送性能的主要因素及关键部位，并分析各个因素对输送性能产生的影响，为解决单纵轴流联合收获机输送系统的堵塞问题提供理论参考。

1　联合收获机物料输送系统

联合收获机物料输送系统包括螺旋输送器、倾斜输送器和脱粒滚筒螺旋喂入头，其作用是将小麦从螺旋输送器喂入开始，经倾斜输送器和脱粒滚筒螺旋喂入头，连续均匀地输送到脱粒分离装置。结构如图 1 所示，单纵轴流小麦联合收获机作业时输送系统易发生堵塞情况，如图 2 所示。

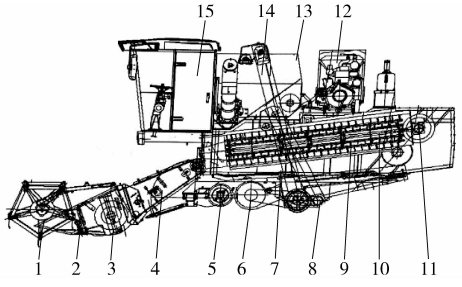


图 1　单纵轴流小麦联合收获机

Fig. 1　Single longitudinal axis wheat combine harvester

1. 拨禾轮　2. 切割器　3. 螺旋输送器　4. 倾斜输送器　5. 行走底盘　6. 风机　7. 抖动板　8. 杂余升运器　9. 凹板　10. 脱粒滚筒　11. 传动箱　12. 发动机　13. 粮箱　14. 籽粒升运器　15. 驾驶室



(a) 螺旋输送器堵塞　(b) 倾斜输送器堵塞

(c) 堵塞导致外壳破损　(d) 脱粒滚筒堵塞

图 2　单纵轴流小麦联合收获机堵塞现象

Fig. 2　Blockage status of single longitudinal axial flow wheat combine harvester

2　单纵轴流联合收获机物料输送过程分析

2.1　螺旋输送器输送过程分析

小麦在螺旋输送器输送过程中，与螺旋输送器产生的摩擦力影响物料输送性能，螺旋输送器处于高速旋转状态，既要考虑受力情况，又要考虑运动情况，对处于工作状态时的螺旋输送器进行动力学分析，如图 3 所示，小麦在螺旋叶片的作用下沿 x 轴作切向运动，同时在摩擦力作用下沿 y 轴作法向运动。

小麦在螺旋输送器滚筒与底板之间的空间运动切向速度 v_1 计算公式为

$$v_1 = (1-\lambda)\omega_1 R_1 \tag{1}$$

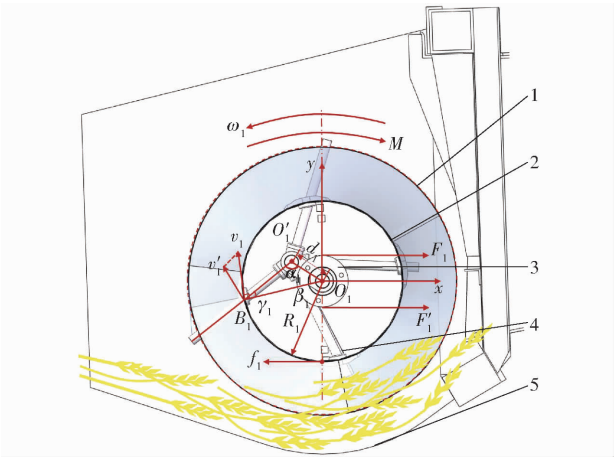


图 3 螺旋输送器输送过程动态受力分析图

Fig. 3 Schematic of dynamic force of screw conveyor during conveying process

1. 螺旋叶片 2. 螺旋输送器滚筒 3. 主动轴 4. 伸缩拨齿 5. 螺旋输送器底板

通过受力分析得 t 时刻动力学平衡方程为

$$(F_1 - F'_1)R'_1 - f_1R_1 + MR_1 + m_1(1-\lambda)\omega_1 R_1^2 - J_1\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = 0 \tag{2}$$

整理可得

$$f_1 = \frac{(F_1 - F'_1)R'_1 + MR_1 - J_1\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}}{R_1} + m_1(1-\lambda)\omega_1 R_1 \tag{3}$$

式中 F_1——传动装置对螺旋输送器主轴紧边拉力,N

F'_1——传动装置对螺旋输送器主轴松边拉力,N

R_1——螺旋输送器滚筒半径,mm

R'_1——螺旋输送器主轴半径,mm

f_1——小麦对螺旋输送器的摩擦力,N

M——螺旋输送器摩擦阻力矩与空气阻力矩之和,N·m

m_1——螺旋输送器与底板之间的小麦质量,kg

λ——小麦切向运动速度系数

ω_1——螺旋输送器滚筒角速度,rad/s

J_1——螺旋输送器转动惯量,kg·m^2

螺旋叶片将小麦拨至割台中央,在伸缩拨齿的作用下将小麦输送至倾斜输送器,螺旋输送器滚筒作等角速度转动,伸缩拨齿在滚筒的带动下作变角速度转动,螺旋输送器滚筒线速度 v_1 与伸缩拨齿线速度 v'_1 之间的关系为

$$\cos\gamma_1 = \frac{v'_1}{v_1} \tag{4}$$

因此螺旋输送器滚筒角速度 ω_1 和伸缩拨齿转动角速度 ω'_1 之间的关系式为

$$\omega_1 R_1 \cos\gamma_1 = \omega'_1 l_{O'_1B_1} \tag{5}$$

其中

$$l_{O'_1B_1} = \frac{R_1 + d_1\cos(\alpha_1 + \gamma_1)}{\cos\gamma_1} \tag{6}$$

$$\omega_1 = 2\pi n_1 \tag{7}$$

整理可得螺旋输送器滚筒转速

$$n_1 = \frac{(R_1 + d_1\cos(\alpha_1 + \gamma_1))\omega'_1}{2\pi R_1\cos^2\gamma_1} \tag{8}$$

式中 d_1——滚筒与伸缩拨齿偏心距,mm

α_1——伸缩拨齿相位角,(°)

n_1——螺旋输送器转速,r/min

收割机生产率 A_1 和喂入量 q 计算公式为

$$A_1 = 5.4\eta B v_3 \tag{9}$$

$$q = \frac{A_1 B v_3}{6.67\beta} \tag{10}$$

式中 η——收获作业系数,取 0.7 ~ 0.8

B——割幅,mm

v_3——收割机前进速度,m/s

β——作物的草谷比,取 1.05 ~ 1.56

由式(2)可知,当螺旋输送器结构参数及传动装置受力一定时,小麦在螺旋输送器中的输送性能由喂入量和螺旋输送器角速度决定。本文以自行设计的单纵轴流联合收获试验台架为基础,分析影响输送性能的参数,其中 R_1 = 150 mm,伸缩拨齿长度 L_1 = 200 mm, d_1 = 68 mm, B = 2 700 mm,查阅文献可知[20],收割机前进速度一般小于 1.85 m/s,代入式(10),可得喂入量最大值为 9.45 kg/s,螺旋输送器最大转速取值为 438 r/min。

2.2 倾斜输送器输送过程分析

倾斜输送器中,链耙对小麦沿底板方向作用力影响输送性能,小麦受链耙作用力 F_2 后,状态由倾斜调至与倾斜输送器底板保持水平,如图 4 所示。质心转动一定的角度,小麦质量为 m_2,链耙压送的小麦长度为 L_2,t 时刻茎杆绕质心转动的微分方程[21]为

$$J_2 a_2 = \frac{F_2 L_2 \sin\theta}{2} \tag{11}$$

$$J_2 = m_2 L_2^2 \tag{12}$$

$$\omega_2 = a_2 t \tag{13}$$

整理可得

$$F_2 = \frac{2m_2 L_2^2 \omega_2}{L_2 \sin\theta t} \tag{14}$$

式中 J_2——小麦的转动惯量,kg·m^2

a_2——小麦在倾斜输送器的角加速度,rad/s^2

θ——倾斜输送器底板与 x 轴的夹角,(°)

ω_2——小麦在倾斜输送器中的角速度,rad/s

链耙对小麦施加的推力为 F_2,对小麦施加的正

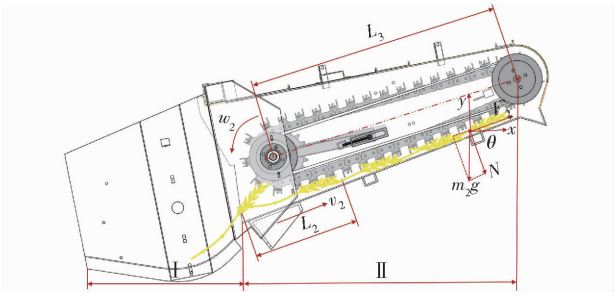


图 4　倾斜输送器输送过程受力分析

Fig. 4　Force analysis during indined conveyor transportation

压力为 N，使小麦沿着倾斜输送器底板向上输送，必须满足条件

$$F_2 \geqslant m_2 g\sin\theta + \mu(N + m_2 g\cos\theta) \tag{15}$$

式中　μ——小麦与倾斜输送器底板摩擦因数

倾斜输送器宽度 $b = 920$ mm，倾斜输送器主动轴和从动轴中心距 $L_3 = 1\,300$ mm，链耙与底板间隙范围为 $h = 8 \sim 15$ mm。倾斜输送器输送小麦质量 m_2 计算公式为

$$m_2 = A_2 b L_3 h \tag{16}$$

其中

$$h = \frac{q}{v_2 b A_2 j} \tag{17}$$

两式联立，求得输送链的线速度

$$v_2 = \frac{qL_3}{mj} \tag{18}$$

根据输送链的速度求得倾斜输送器主动轴转速

$$n_2 = \frac{60 v_2}{\pi d_2} \tag{19}$$

式中　A_2——链耙输送小麦容积密度，kg/m^3

j——物料的填充系数，取 0.6 ~ 0.8

d_2——主动链轮分度圆直径，mm

由式(14)可知，当倾斜输送器结构参数一定时，小麦在倾斜输送器中的输送性能由链耙与底板间小麦的质量和小麦在倾斜输送器中的运动速度决定。螺旋输送器转速越快，单位时间输送到倾斜输送器的小麦质量越多，间接影响倾斜输送器的输送性能；倾斜输送器主动轴转速决定链耙压送速度，间接决定小麦的运动速度，影响输送性能。下文将通过二次正交旋转中心组合试验分析其他因素的影响作用。查阅文献可知[20]，小麦容积密度取 750 kg/m^3 时，喂入量 q 最大取值为 9.45 kg/s，所以由式(18)可知，输送链最大线速度为 2.28 m/s，主动链轮分度圆直径 $d_2 = 102$ mm，根据式(19)计算，倾斜输送器主动轴转速最大取值为 435 r/min。

2.3　脱粒滚筒喂入头输送过程分析

脱粒滚筒螺旋喂入头由螺旋叶片、锥形筒和后连接板组成，小麦在螺旋叶片的作用下，单位时间内轴向输送的小麦越多，输送能力越好。螺旋叶片上小麦的受力分析如图 5 所示。

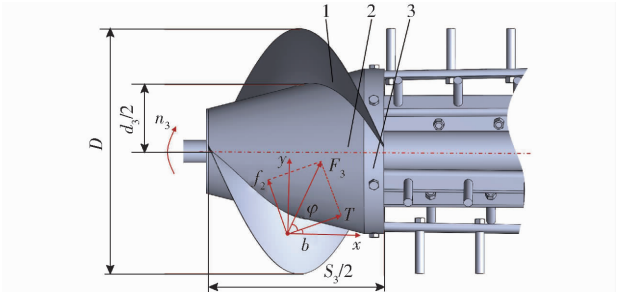


图 5　螺旋喂入头输送过程小麦受力分析

Fig. 5　Analysis of force on wheat during conveying by screw feeding head

1. 螺旋叶片　2. 锥形筒　3. 后连接板

螺旋叶片与小麦存在摩擦力 f_2 和法向推力 T，两者的合力 F_3 与 T 偏离一个角度 φ，即小麦与螺旋叶片的摩擦角，为提高螺旋叶片小麦输送能力，螺旋叶片的轴向输送能力需大于联合收割机喂入量[22]，螺旋喂入头单位时间内输送的小麦质量 Q 计算公式为

$$Q = \frac{\pi}{24}[(D - 2d_4)^2 - d_3^2]jS_3 n_3 \rho CP \times 10^{-10} \tag{20}$$

式中　D——螺旋叶片外径，mm

d_3——螺旋叶片内径，mm

d_4——螺旋叶片与壳体间隙，mm

S_3——螺旋叶片螺距，mm

n_3——脱粒滚筒转速，r/min

ρ——小麦密度，kg/m^3

C——脱粒滚筒倾斜输送系数，取 0.88

P——螺旋叶片罩壳包角系数，喂入头部分罩壳包角为 180°，取 0.5

通过螺旋叶片上小麦受力分析，由式(20)可知，当螺旋喂入头结构参数一定时，小麦在螺旋喂入头的输送能力主要由脱粒滚筒转速和螺旋喂入头单位容积作业的小麦质量决定。但其他因素对螺旋喂入头的输送性能也有影响，下文将通过二次正交旋转中心组合试验分析其他因素的影响作用。喂入头螺旋叶片外径为 455 mm，螺旋叶片内径为 280 mm，螺旋叶片与壳体间隙为 60 ~ 118 mm，螺旋叶片螺距为 790 mm，小麦密度为 750 kg/m^3，当单位时间输送小麦质量取最大值9.45 kg/s 时，脱粒滚筒转速最大取值为 1 311 r/min。

3　物料输送仿真试验

通过上文理论分析，得到影响物料输送性能的各个因素，小麦在联合收获机输送过程中，由于受到各个部件的随机碰撞，物料运动极不规律，传统的研

究方法很难得到其运动轨迹,借助 EDEM 软件可以直观地观察到物料在联合收获机中的运动状态,利用 Recurdyn 软件可以实现链耙式倾斜输送器等输送部件的复杂刚体运动。因此采用 EDEM – Recurdyn 耦合仿真方法验证理论分析,并研究小麦在输送系统中的迁移规律、轴向速度和局部物料质量流率变化情况。

在 Recurdyn 中,使用自带 Chain 模块生成链轮和链条,主动链轮分别设置主动转动副,从动链轮分别设置从动转动副,将链耙 SolidWorks 三维模型导入 Recurdyn 中,添加约束使其固定在链条上,通过主动链轮提供动力驱动链耙转动,在链耙的压送作用下,将小麦连续均匀地输送到脱粒分离装置。通过配置文件传输所有链耙的 wall 文件数据实现 EDEM – Recurdyn 的耦合。

3.1 输送系统离散元模型建立

采用传送带的形式将小麦输送到螺旋输送器,为便于仿真分析,略去输送过程中与物料非接触的部件,用 SolidWorks 创建物料输送系统三维模型并导入到 EDEM 中,离散元模型如图 6 所示。其中螺旋输送器长度为 2 700 mm,倾斜输送器宽 920 mm,滚筒长度和直径分别为 3 230 mm 和 550 mm。

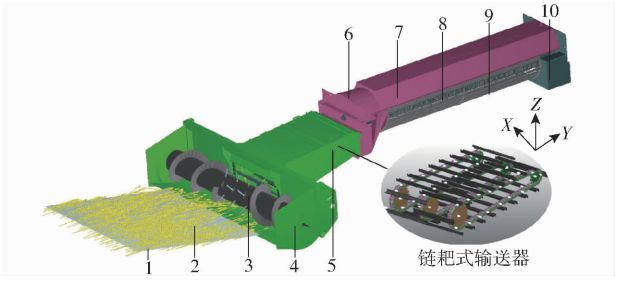


图 6 联合收获机物料输送系统离散元模型

Fig. 6 Discrete element model of material harvesting system of combine harvester

1. 传送带 2. 小麦 3. 螺旋输送器 4. 割台外壳 5. 倾斜输送器 6. 滚筒喂入头 7. 滚筒上盖 8. 脱粒滚筒 9. 凹板 10. 排杂口

3.2 小麦植株离散元模型建立

3.2.1 小麦植株模型定义

本文小麦从河南省驻马店农业科学院取样,品种为淮麦 40,是目前河南省主推的小麦品种之一,发育时期为蜡熟期,含水率为 17.98% ~22.44%。经多次测量,麦穗质量占总植株的 59.07%,茎秆质量占总植株的 31.45%,叶片质量占总植株的 9.48%,收获期小麦叶片较薄,含水率低,易折碎,叶片对输送过程中的堵塞问题影响较小,因此,为提高仿真运行速度,对小麦模型进行简化,只包括空心茎秆和麦穗,不包括叶片,利用数显游标卡尺测量基础尺寸,如表 1 所示,为建立小麦离散元模型提供数据基础。

表 1 小麦几何尺寸

Tab. 1 Geometric dimensions of wheat

参数	范围/mm	均值/mm	标准差/mm
茎秆长度	580.19 ~650.32	607.95	1.35
茎秆壁厚	0.60 ~0.95	0.71	0.09
茎秆外径	3.52 ~5.31	4.59	0.31
麦穗长度	78.24 ~85.32	80.50	1.05
麦粒长轴	5.66 ~6.45	6.06	0.12
麦粒短轴	2.54 ~3.02	2.82	0.08

3.2.2 收获期小麦植株离散元模型建立

多尺度颗粒聚合即定义不同尺度的颗粒簇,借助 EDEM 提供的应用程序编程 API 接口,首先分别构建小麦茎秆和麦穗的三维网格外形轮廓,设置全局变量,在后处理界面分别提取颗粒集合体内部填充颗粒球的坐标、粒度等信息;其次采用 Visual studio C + + 可视化软件开发工具,分别编写茎秆和麦穗的自定义颗粒工厂插件;最后添加编译好的两个 API 颗粒工厂插件,基于 Hertz – Mindlin with bonding 粘结接触模型构建小麦离散元模型,如图 7 所示。该接触模型能够承受一定量的法向和切向位移,直至到达临界法向和切向力,因此构建的小麦模型能够弯曲和破碎,在此前提下进行仿真试验,后文将分析小麦在连续输送过程中的轴向速度和局部物料质量流率,找出堵塞关键部位。

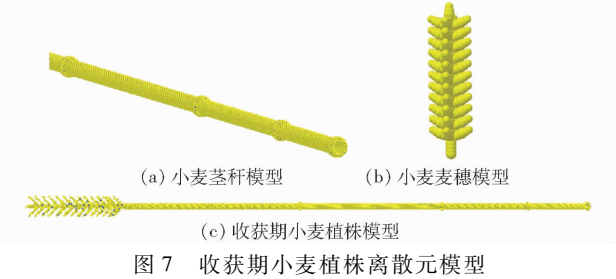


图 7 收获期小麦植株离散元模型

Fig. 7 Discrete element model of wheat plant in harvest

3.2.3 仿真参数

为提高离散元仿真试验的可靠性,采用东莞智取精密仪器有限公司生产的 ZQ – 890B 型专业电子试验机进行试验测定,采用实验室自主设计制造的物料特性综合测试装置[23]建立物料–钢板的碰撞恢复系数测定模型、静摩擦因数测定模型和滚动摩擦因数测定模型。利用台架试验和仿真模拟相结合的方法对物料–钢板间的接触参数进行标定和校准,建立曲线拟合方程,将台架试验中对各因素所测定的值作为仿真目标值代入拟合方程中得到接触参数,并进行仿真试验验证。Hertz – Mindlin with bonding 粘结参数参考相关文献获得各个参数的范围[24 – 27],采用小麦茎秆径向堆积角的方法,结合台架试验和

仿真模拟对粘结参数进行标定，并应用 Origin 软件位置读取功能，获取茎秆中心位置的拟合直线，最终确定离散元仿真中粘结特性参数值，机器壳体材料为 Q235 钢，离散元仿真参数如表 2 所示。

表 2　离散元仿真参数

Tab. 2　Discrete element simulation contact parameters

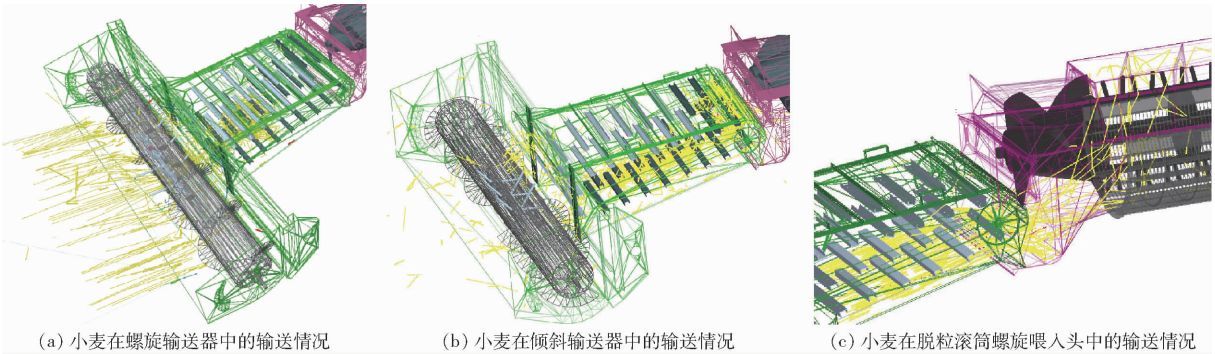
材料	参数	数值
茎秆	泊松比	0.4
	密度/(kg·m^{-3})	1 670
	弹性模量/Pa	1.696×10^{4}
钢板	泊松比	0.29
	密度/(kg·m^{-3})	8×10^{3}
	弹性模量/Pa	2.07×10^{8}
茎秆-钢板	恢复系数	0.68
	静摩擦因数	0.32
	滚动摩擦因数	0.01
茎秆-麦粒	恢复系数	0.26
	静摩擦因数	0.34
	滚动摩擦因数	0.01
茎秆-茎秆	恢复系数	0.28
	静摩擦因数	0.38
	滚动摩擦因数	0.01
	法向刚度/(N·m^{-1})	450
	切向刚度/(N·m^{-1})	210
	剪切强度/Pa	6×10^{3}
	拉伸强度/Pa	2.5×10^{4}
	粘结半径/mm	1.5

3.3　物料输送仿真分析

通过前文理论分析，割幅为 2 700 mm 的全喂入自走式联合收获机喂入量最大取值为 9.45 kg/s，螺旋输送器转速最大值为 438 r/min，倾斜输送器主动轴转速最大值为 435 r/min，脱粒滚筒转速最大值为 1 311 r/min。仿真试验参数参考理论分析取值，分别为喂入量 7.5 kg/s，螺旋输送器转速 320 r/min，倾斜输送器主动轴转速 350 r/min，脱粒滚筒转速 1 050 r/min。先将小麦生成到传送带上，穗头朝内，以 7.5 kg/s 的喂入量传送至螺旋输送器，在螺旋叶片和伸缩拨齿共同作用下将小麦输送至倾斜输送器，螺旋输送器中的输送情况如图 8a 所示；在倾斜输送器链耙的压送作用下，连续均匀地输送到脱粒装置，倾斜输送器中的输送情况如图 8b 所示；最后通过脱粒滚筒螺旋喂入头的作用将小麦疏导引流到脱粒分离装置，脱粒滚筒螺旋喂入头中的输送情况如图 8c 所示。

小麦的输送速度和单位时间输送小麦的质量是影响物料输送的主要因素，结合 EDEM 后处理功能，采用小麦轴向速度衡量物料输送速度，轴向即沿着脱粒滚筒旋转中心轴向后输送的方向，在螺旋输送器、倾斜输送器和脱粒滚筒部位分别建立局部物料质量流率传感器，监测单位时间内输送的小麦质量，如图 9 所示。假设螺旋输送器内输送小麦的质量流率为 Q_1，倾斜输送器内输送小麦的质量流率为 Q_2，脱粒滚筒内输送小麦的质量流率为 Q_3，若 $Q_1<Q_2<Q_3$，则物料在整个输送系统中输送通畅；若 $Q_1>Q_2$，螺旋输送器单位时间输送的小麦质量比倾斜输送器多，则倾斜输送器部位易堵塞；若 $Q_2>Q_3$，倾斜输送器单位时间输送的小麦质量比脱粒滚筒多，则脱粒滚筒部位易堵塞，前 2.5 s 是小麦生成到传送带的时间。

小麦轴向速度变化曲线如图 10 所示，在时间段Ⅰ，小麦经螺旋输送器输送到倾斜输送器；在时间段Ⅱ，小麦经倾斜输送器连续输送，轴向速度逐渐升高，在时间段Ⅲ，小麦到达脱粒滚筒，小麦在脱粒滚筒螺旋喂入头速度呈降低趋势，之后到达脱粒分离装置，速度逐渐升高，主要原因是：倾斜输送器出口与脱粒滚筒喂入口处有一段过渡距离，并且脱粒滚筒有一定的倾斜角度；因此螺旋喂入头部分小麦速度呈降低趋势，倾斜输送器出口至脱粒滚筒螺旋喂入头部分是解决输送系统堵塞的关键部位。通过 EDEM 处理功能，分析单纵轴流小麦联合收获机喂入螺旋输送器、倾斜输送器和脱粒滚筒内的平均物料质量流率，其中小麦在喂入螺旋输送器内的平均物料质量流率 Q_1 为 1.82 kg/s，在倾斜输送器内的平



(a) 小麦在螺旋输送器中的输送情况　(b) 小麦在倾斜输送器中的输送情况　(c) 小麦在脱粒滚筒螺旋喂入头中的输送情况

图 8　小麦在输送系统中的运动情况

Fig. 8　Movement of wheat in the conveyor system

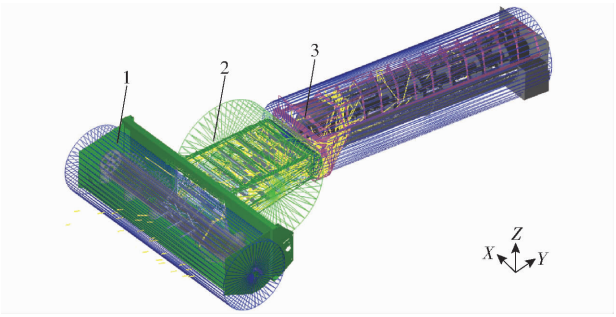


图 9 局部物料质量流率监测器

Fig. 9 Partial material mass flow monitor

1. 螺旋输送器质量流率传感器 2. 倾斜输送器质量流率传感器 3. 脱粒滚筒质量流率传感器

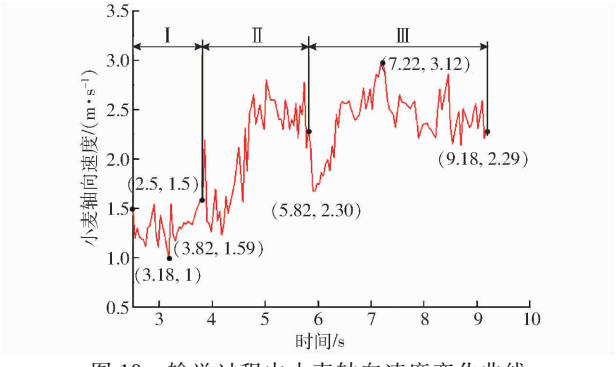


图 10 输送过程中小麦轴向速度变化曲线

Fig. 10 Change curve of axial speed of wheat during transportation

均物料质量流率 Q_2 为 2.06 kg/s,在脱粒滚筒内的平均物料质量流率 Q_3 为 2.10 kg/s, $Q_1 < Q_2 < Q_3$,整个输送过程较为通畅,没有出现堵塞情况。

4 二次正交旋转中心组合试验

4.1 仿真试验设计方案与结果

根据前文理论分析,喂入量和螺旋输送器滚筒角速度影响小麦在螺旋输送器中的输送性能;链耙压送的小麦质量和倾斜输送器主动轴转速影响倾斜输送器中的输送性能;脱粒滚筒转速和作业小麦质量影响小麦在脱粒滚筒螺旋喂入头中的输送性能。但各个因素及因素间对输送性能产生的影响是未知的,因此,选取喂入量、螺旋输送器转速、倾斜输送器主动轴转速和脱粒滚筒转速为试验因素,运用四因素五水平二次正交旋转中心组合试验设计方法,研究各因素及因素间对输送性能的影响,设计试验因素编码如表 3 所示,试验设计方案与结果如表 4 所示。其中试验因素 X_1、X_2、X_3 和 X_4 分别为喂入量、螺旋输送器转速、倾斜输送器主动轴转速和脱粒滚筒转速的编码值,试验指标 Y 为物料输送时间。

4.2 回归模型检验与交互作用响应曲面分析

利用 Design-Expert 软件对试验结果进行多元

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Coding of experiment factors

编码	因素			
	喂入量 x_1/(kg·s^{-1})	螺旋输送器转速 x_2/(r·min^{-1})	倾斜输送器主动轴转速 x_3/(r·min^{-1})	脱粒滚筒转速 x_4/(r·min^{-1})
-2	7.0	260	300	900
-1	7.5	280	325	975
0	8.0	300	350	1 050
1	8.5	320	375	1 125
2	9.0	340	400	1 200

表 4 试验方案与结果

Tab. 4 Experiment scheme and results

试验序号	X_1	X_2	X_3	X_4	输送时间 Y/s
1	-1	-1	-1	-1	8.29
2	1	-1	-1	-1	8.55
3	-1	1	-1	-1	6.29
4	1	1	-1	-1	6.79
5	-1	-1	1	-1	6.59
6	1	-1	1	-1	7.53
7	-1	1	1	-1	5.67
8	1	1	1	-1	6.83
9	-1	-1	-1	1	5.99
10	1	-1	-1	1	7.09
11	-1	1	-1	1	5.08
12	1	1	-1	1	6.68
13	-1	-1	1	1	5.59
14	1	-1	1	1	7.09
15	-1	1	1	1	5.78
16	1	1	1	1	7.83
17	-2	0	0	0	5.39
18	2	0	0	0	7.48
19	0	-2	0	0	8.02
20	0	2	0	0	6.75
21	0	0	-2	0	9.82
22	0	0	2	0	6.63
23	0	0	0	-2	7.49
24	0	0	0	2	5.12
25	0	0	0	0	5.68
26	0	0	0	0	5.55
27	0	0	0	0	5.30
28	0	0	0	0	5.45
29	0	0	0	0	5.29
30	0	0	0	0	5.39
31	0	0	0	0	5.23

回归拟合分析,方差分析如表 5 所示,喂入量、螺旋输送器转速和脱粒滚筒转速对输送时间均具有极显著影响,倾斜输送器主动轴转速对输送时间具有显著影响,影响由大到小依次为喂入量、脱粒滚筒转速、螺旋输送器转速、倾斜输送器主动轴转速;其中喂入量与螺旋输送器转速之间、喂入量与倾斜输送

表 5　回归方程方差分析

Tab. 5　ANOVA of regression equation

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	41.81	14	78.47	<0.000 1 **
X_1	7.36	1	193.37	<0.000 1 **
X_2	2.88	1	75.60	<0.000 1 **
X_3	0.31	1	8.06	0.011 8 *
X_4	4.37	1	114.82	<0.000 1 **
X_1X_2	0.14	1	3.74	0.070 9 *
X_1X_3	0.30	1	7.88	0.012 7 *
X_1X_4	0.72	1	18.87	0.000 5 **
X_2X_3	1.20	1	31.65	<0.000 1 **
X_2X_4	1.56	1	40.89	0.000 1 **
X_3X_4	3.87	1	101.74	<0.000 1 **
X_1^2	1.88	1	49.51	0.000 1 **
X_2^2	6.77	1	177.85	<0.000 1 **
X_3^2	1.30	1	34.26	0.000 1 **
X_4^2	1.21	1	31.77	<0.000 1 **
残差	0.61	16		
失拟	0.46	10		0.247 4
误差	0.15	6		
总和	42.42	30		

注：* 表示差异显著，** 表示差异极显著。

器主动轴转速之间、喂入量与脱粒滚筒转速之间、螺旋输送器转速与倾斜输送器主动轴转速间、螺旋输送器与脱粒滚筒之间、倾斜输送器主动轴转速与脱粒滚筒转速间均存在交互作用。回归模型失拟项 P 值为 0.247 4，回归方程不失拟，得到 Y 的回归方程为

$$Y = 5.43 + 1.11X_1 - 0.69X_2 - 0.26X_3 - 0.83X_4 + 0.38X_1X_2 + 0.55X_1X_3 + 0.85X_1X_4 + 1.10X_2X_3 + 1.25X_2X_4 + 1.29X_3X_4 + 1.06X_1^2 + 2.01X_2^2 + 1.15X_3^2 + 0.88X_4^2 \quad (21)$$

如图 11a 所示，输送时间随螺旋输送器转速的增加呈先减小后增加的趋势，主要是由于螺旋输送器转速增加时，单位时间输送的小麦质量增加，作业效率提高，输送时间减小；随着螺旋输送器转速的增加，单位时间输送到倾斜输送器的小麦质量增多，而倾斜输送器转速不变，螺旋输送器出口处易出现拥堵现象，输送时间增加。输送时间随喂入量的增加呈增大的趋势，这是由于喂入量不断增加，联合收获机作业小麦质量越多，输送时间越长。

如图 11b 所示，输送时间随喂入量的增加呈增大的趋势；输送时间随倾斜输送器主动轴转速的增加呈先减小后增加的趋势，这是由于倾斜输送器主动轴转速增加时，小麦受到的链耙作用力越大，输送越快，时间减小；当倾斜输送器转速持续增加时，单位时间输送到脱粒滚筒喂入头的小麦越多，而脱粒滚筒转速不变，在倾斜输送器出口处易出现拥堵现象，输送时间增加。

如图 11c 所示，输送时间随喂入量的增加呈增大的趋势；在喂入量较低时，输送时间随脱粒滚筒转速的增加呈现降低趋势，喂入量较高时，输送时间随脱粒滚筒转速的增加呈现先降低后增高的趋势，主要是由于脱粒滚筒转速增大，小麦在螺旋喂入头喂入速度越大，输送时间越短；而喂入量越大，单位时

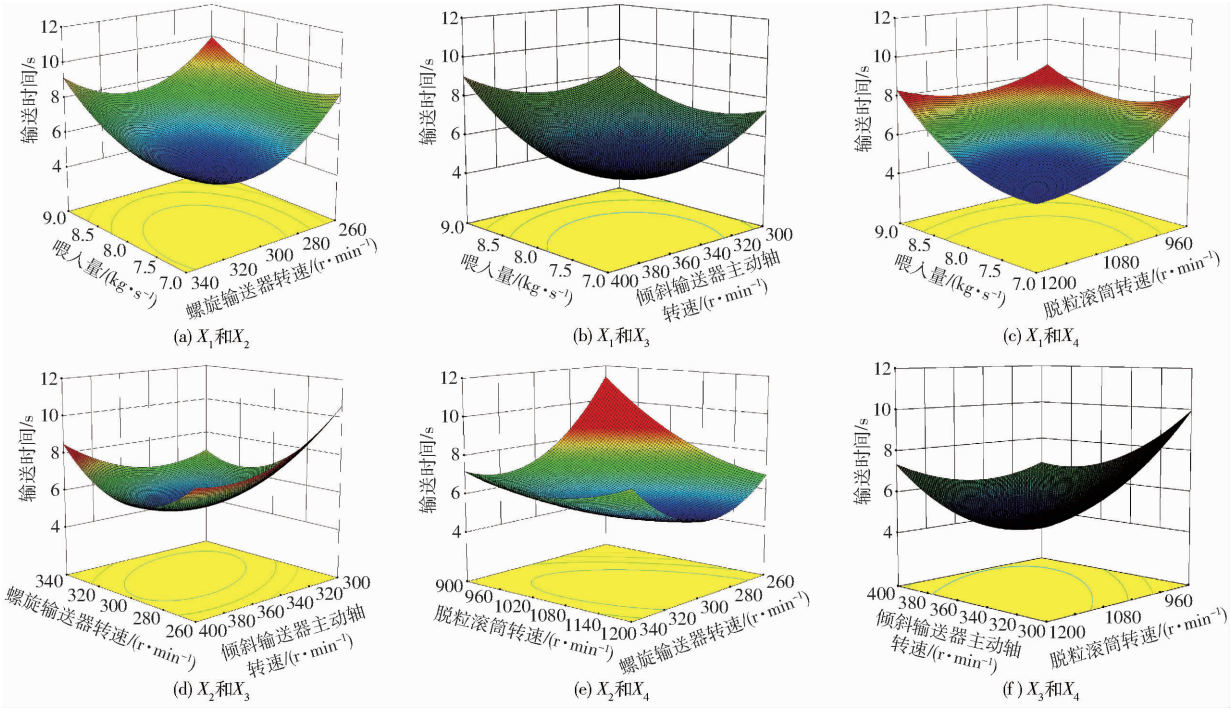


图 11　各因素交互作用对性能评价指标的影响

Fig. 11　Influence of interaction of various factors on performance evaluation index

间内输送系统输送的作物量越多,机器功耗增加,输送时间增加。

如图 11d 所示,输送时间随螺旋输送器转速的增加呈现先减小后增加的趋势,主要是由于螺旋输送器转速增加时,单位时间作业小麦质量增加,输送时间减小;当转速持续增加,倾斜输送器负荷增大,总输送时间增加。当倾斜输送器主轴转速增加时,单位时间输送小麦增多,输送时间减小,随着转速持续增加,小麦易在脱粒滚筒螺旋喂入头处聚集,输送时间增加。

如图 11e 所示,输送时间随脱粒滚筒转速的增加,呈先降低后增加的趋势;随螺旋输送器转速的增加,呈先降低后增加的趋势,但输送时间对脱粒滚筒转速的影响比螺旋输送器转速显著。

如图 11f 所示,当倾斜输送器主动轴转速较低时,输送时间随脱粒滚筒转速的增加呈减小的趋势,主要由于倾斜输送器转速一定,单位时间输送到脱粒滚筒小麦质量一定,脱粒滚筒转速增加,脱粒滚筒螺旋喂入头输送小麦越快,输送时间越短;当倾斜输送器主动轴转速较大时,输送时间随脱粒滚筒转速的增加呈先减小后增大的趋势。

4.3 试验结果的目标优化

为寻求约束条件范围内各因素最优组合,为后期研究单纵轴流小麦联合收获试验台架提供最佳输送性能参数依据,将输送时间作为评价指标,结合因素边界条件建立数学模型,对输送性能指标回归模型进行多目标优化求解,优化目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min\ Y(x_1,x_2,x_3,x_4) \\ 7.5\ \text{kg/s} \leqslant x_1 \leqslant 8.5\ \text{kg/s} \\ 280\ \text{r/min} \leqslant x_2 \leqslant 320\ \text{r/min} \\ 325\ \text{r/min} \leqslant x_3 \leqslant 375\ \text{r/min} \\ 975\ \text{r/min} \leqslant x_4 \leqslant 1\ 125\ \text{r/min} \end{cases} \tag{22}$$

以物料输送时间最短作为优化目标进行多目标优化,经求解得到喂入量为 7.52 kg/s、螺旋输送器转速为 308 r/min,倾斜输送器主动轴转速为 369 r/min、脱粒滚筒转速为 1 083 r/min 时,输送时间最短为 6.37 s。

4.4 物料输送验证试验

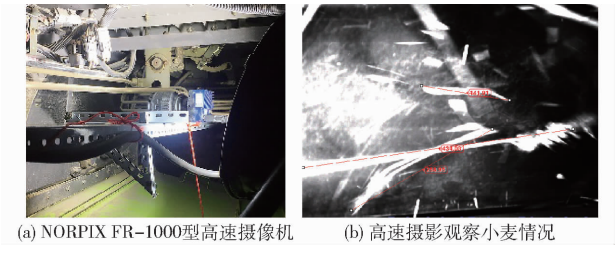
为验证仿真优化结果,选取与仿真条件一致的蜡熟期淮麦 40 小麦,含水率为 19.76%,试验台架为中联重科 4LZ-8BZ1 型单纵轴流小麦联合收获机,并在河南农业大学农业装备试验基地进行试验,试验现场如图 12 所示。传送带高度设置为 20 cm,使割台高度与田间作业高度保持一致,结合 GB/T 8097—2008《收获机械 联合收割机 试验方法》中收获试验要求,以物料输送时间为试验指标[28]。输送时间是指传送带将小麦输送到螺旋输送器开始,经倾斜输送器和脱粒滚筒螺旋喂入头,至完全到达脱粒滚筒的时间,对比模拟仿真的输送时间与验证试验的输送时间。为观察小麦在单纵轴流联合收获机输送系统中的输送时间,将脱粒滚筒前挡板更换为透明亚克力板,采用 NORPIX FR-1000 型高速数字摄像机拍摄输送情况,摄像机位置及高速摄影情况如图 13 所示,从传送带运转时刻开始录制,重复试验 5 次,试验结果如表 6 所示。



图 12 小麦输送性能试验现场

Fig. 12 Wheat transport performance experiment site

1. 单纵轴流小麦联合收获机 2. 光源 3. 高速相机与高速图像采集卡 4. 计算机 5. 传送带 6. 小麦



(a) NORPIX FR-1000型高速摄像机 (b) 高速摄影观察小麦情况

图 13 高速摄影试验

Fig. 13 High-speed photography experiment

表 6 输送性能试验结果

Tab. 6 Transmission performance experiment results

试验序号	输送时间/s	平均值/s	标准差/s
1	6.34		
2	6.76		
3	6.75	6.63	0.18
4	6.50		
5	6.78		

采用 image-pro premier 图像分析软件分析采集到的图像,根据采集窗口内长茎秆的数量来判断物料输送截止时间。试验结果表明,在单纵轴流联合收获机物料输送系统中小麦平均输送时间为 6.63 s,与模拟仿真时间误差为 4.08%,台架试验结果与仿真试验基本相符,验证了仿真试验的可靠性。

5 结论

(1)通过运动学分析和理论计算,确定了喂入量和螺旋输送器转速是影响螺旋输送器输送性能的

关键参数，其中喂入量最大取值为 9.45 kg/s，螺旋输送器转速最大取值为 438 r/min；确定链耙压送小麦质量和倾斜输送器主动轴转速是影响倾斜输送器输送性能的关键参数，其中倾斜输送器主动轴转速最大取值为 435 r/min；确定脱粒滚筒转速和作业小麦质量是影响脱粒滚筒螺旋喂入头输送性能的关键参数，其中脱粒滚筒转速最大取值为 1 311 r/min。

（2）通过 EDEM－Recurdyn 耦合仿真方法分析了小麦从螺旋输送器喂入开始，经倾斜输送器，直至到达脱粒滚筒螺旋喂入头连续输送过程中的运动情况，结果表明当喂入量为 7.5 kg/s、螺旋输送器转速为 320 r/min、倾斜输送器主动轴转速为 350 r/min、脱粒滚筒转速为 1 050 r/min 时，输送过程中的物料平均质量流率从小到大依次为螺旋输送器、倾斜输送器、脱粒滚筒，小麦在连续输送过程中较为通畅，但是小麦轴向速度在脱粒滚筒螺旋喂入头处呈明显降低趋势，倾斜输送器出口至脱粒滚筒螺旋喂入头部分是解决输送系统堵塞的关键部位。

（3）通过二次正交旋转中心组合试验得到输送时间的回归方程，经方差分析，得到影响物料输送时间的因素重要性由大到小依次为喂入量、脱粒滚筒转速、螺旋输送器转速、倾斜输送器主动轴转速，其中各因素之间均存在交互作用。对回归方程多目标优化求解，确定喂入量为 7.52 kg/s、螺旋输送器转速为 308 r/min、倾斜输送器主动轴转速为 369 r/min、脱粒滚筒转速为 1 083 r/min 时，输送时间为 6.37 s，输送时间最短，对最优组合参数进行试验验证，结果表明试验与仿真模拟误差为 4.08%，验证了数值仿真结果的可靠性，为解决单纵轴流小麦联合收获机物料输送堵塞问题提供理论依据。

参　考　文　献

[1] 樊晨龙，崔涛，张东兴，等. 纵轴流联合收获机双层异向清选装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(增刊)：239－248.
FAN Chenlong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of double-layered reverse cleaning device for axial flow combine harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 239－248. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2018s032&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.032. (in Chinese)

[2] 魏忠彩，李洪文，孙传祝，等. 基于多段分离工艺的马铃薯联合收获机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2019，50(1)：129－140，112.
WEI Zhongcai, LI Hongwen, SUN Chuanzhu, et al. Design and experiment of potato combined harvester based on multi-stage separation technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 129－140, 112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190114&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.014. (in Chinese)

[3] 李耀明，李洪昌，徐立章，等. 短纹杆-板齿式轴流脱粒分离装置性能试验[J]. 农业机械学报，2009，40(7)：88－92.
LI Yaoming, LI Hongchang, XU Lizhang, et al. Performance test of short-rasp-bar of axial flow threshing and separating unit [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 88－92. (in Chinese)

[4] 郝付平，陈志，张宗玲，等. 玉米穗茎联合收获台茎秆切碎输送装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2019，50(增刊)：67－72.
HAO Fuping, CHEN Zhi, ZHANG Zongling, et al. Design and experiment of corn stalk combined harvesting header stalk chopping conveyor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 67－72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2019s011&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.011. (in Chinese)

[5] 刘爱玲. 小麦联合收割机的常见故障及排除方法 [J]. 农机使用与维修，2018(9)：41.
LIU Ailing. Common failures and elimination methods of wheat combine harvester [J]. Agricultural Machinery Use and Maintenance, 2018(9): 41. (in Chinese)

[6] 江涛，吴崇友，汤庆，等. 基于 ANSYS 和 EDEM 的小麦茎秆切割仿真研究 [J]. 江苏农业科学，2018，46(17)：231－234.
JIANG Tao, WU Chongyou, TANG Qing, et al. Simulation of wheat straw cutting based on ANSYS and EDEM [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(17): 231－234. (in Chinese)

[7] 李敏通，刘家骥，朱李军，等. 联合收割机割台及过桥振动有限元模态分析[J]. 中国农机化学报，2017，38(7)：10－16.
LI Mintong, LIU Jiaji, ZHU Lijun, et al. Finite element modal analysis of combine harvester head and crossing bridge vibration [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(7): 10－16. (in Chinese)

[8] 杨方飞，阎楚良. 谷物在纵向轴流滚筒脱粒空间中的运动状态分析[J]. 农业机械学报，2008，39(11)：48－50，25.
YANG Fangfei, YAN Chuliang. Movement analysis of cereal in axial flow threshing roller space [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11): 48－50, 25. (in Chinese)

[9] MIU P I, KUTZBACH H D. Modeling and simulation of grain threshing and separation in threshing units—Part I [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2007, 60(1): 96－104.

[10] 宗望远，廖庆喜，黄鹏，等. 组合式油菜脱粒装置设计与物料运动轨迹分析[J/OL]. 农业机械学报，2013，44(增刊 2)：41－46.
ZONG Wangyuan, LIAO Qingxi, HUANG Peng, et al. Design of combined rape threshing device and analysis of rape cane

movement trail[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp.2):41 - 46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2013s209&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.009. (in Chinese)

[11] 蒋恩臣,孙占峰,潘志洋,等. 基于 CFD - DEM 的收获机分离室内谷物运动模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(4):117 - 122.
JIANG Enchen, SUN Zhanfeng, PAN Zhiyang, et al. Numerical simulation based on CFD - DEM and experiment of grain moving laws in inertia separation chamber[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(4):117 - 122. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20140418&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.018. (in Chinese)

[12] 衣淑娟, 蒋恩臣. 轴流脱粒与分离装置脱粒过程的高速摄像分析[J]. 农业机械学报, 2008,39(5):52 - 55.
YI Shujuan, JIANG Enchen. High-speed photography analysis on process of threshing of axial flow threshing and separating installation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(5):52 - 55. (in Chinese)

[13] 陶桂香, 衣淑娟. 组合式轴流装置稻谷运动仿真及高速摄像验证[J]. 农业机械学报,2009,40(2):84 - 86.
TAO Guixiang, YI Shujuan, Simulation of the rice motion model in axial threshing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(2):84 - 86. (in Chinese)

[14] 付宏, 王常瑞, 靳聪, 等. 成熟期小麦植株建模方法研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2017, 49(2): 64 - 68.
FU Hong, WANG Changrui, JIN Cong, et al. Research on modeling method of wheat plants in mature period [J]. Journal of Northeast Normal University(Natural Science Edition), 2017, 49(2): 64 - 68. (in Chinese)

[15] 于亚军, 于建群, 陈仲, 等. 三维离散元法边界建模软件设计 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 99 - 103,98.
YU Yajun, YU Jianqun, CHEN Zhong, et al. Design of 3D DEM boundary modeling software [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 99 - 103,98. (in Chinese)

[16] YU Yajun, YU Jiyang, LI Qinglong, et al. Analysis on the contact interaction between thresher and corn ears based on the DEM [J]. Applied Mechanics and Materials,2013,246 - 247:71 - 77.

[17] BART L, THOMS A, ENGELBERT T, et al. Simulation of grain-straw separation by discrete element modeling with bendable straw particles [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014,101:24 - 33.

[18] GONZALEZ M C, FUENTES J M, AYUGA T E, et al. Determination of the mechanical properties of maize grains and olives required for use in DEM simulations [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(4): 553 - 562.

[19] 王美美, 王万章, 杨立权, 等. 基于 EDEM 的玉米子粒建模方法的研究[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(1):80 - 84,103.
WANG Meimei, WANG Wanzhang, YANG Liquan, et al. Research of discrete element modeling method of maize kernel based on EDEM [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018,52(1): 80 - 84,103. (in Chinese)

[20] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.

[21] 张银平, 刁培松, 杜瑞成, 等. 穗茎兼收型玉米收获机茎秆切碎与输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊):208 - 214.
ZHANG Yinping, DIAO Peisong, DU Ruicheng, et al. Design and test of stalk chopping and conveying device for corn combine reaping both stalk and spike [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47 (Supp.): 208 - 214. (in Chinese)

[22] 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? flag = 1&file_no = 20190714&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.014. (in Chinese)

[23] 杨立权. 切流横轴流玉米脱粒系统设计及试验研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018.
YANG Liquan. Design and experiment research based on tangential flow transverse axial flow corn threshing system [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[24] 李小城, 刘梅英, 牛智有. 小麦秸秆剪切力学性能的测试[J]. 华中农业大学学报,2012,31(2):253 - 257.
LI Xiaocheng, LIU Meiying, NIU Zhiyou. Test of shear mechanical properties of wheat stalks [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2012,31(2):253 - 257. (in Chinese)

[25] 方会敏, 姬长英, 张庆怡, 等. 小麦茎秆力学性能的国内外研究[J]. 中国农机化学报,2014,35(6):304 - 308.
FANG Huimin, JI Changying, ZHANG Qingyi, et al. Research on mechanical properties of wheat straw at home and abroad [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014,35(6):304 - 308. (in Chinese)

[26] 李小城. 收获期小麦茎秆力学特性参数的试验研究[D]. 武汉:华中农业大学,2012.
LI Xiaocheng. Experimental research on the mechanical physical parameters of wheat stalks in harvesting period [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2012. (in Chinese)

[27] 付君, 钱志辉, 尹维, 等. 小麦摩擦与拉伸性能[J]. 吉林大学学报(工学版),2015,45(2):501 - 507.
FU Jun, QIAN Zhihui, YIN Wei, et al. Wheat friction and tensile properties[J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition),2015,45(2):501 - 507. (in Chinese)

[28] 张巍. 割前摘脱稻(麦)联合收割机振动输送装置研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2007.
ZHANG Wei. Studies on the vibration transportaion of combine harvester threshing prior to cutting [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2007. (in Chinese)