doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.S1.008

气送式玉米高速精量排种器供种系统设计与试验

高筱钧　于涞源　吴晓鹏　黄玉祥　闫小丽
(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对气送式玉米高速精量排种器进行高速精量播种时排种器内存种量波动较大,无法维持最佳作业状态的问题,提出通过改进供种装置结构、优化供种控制模型的技术思路。设计了一种智能供种系统,采用可替换轮片的新型供种轮结构和以正弦函数为基础的波动变量供种方式,根据供种效果实时调节供种速度波动幅度,从而使排种器内的存种量保持在较好区间,确保排种器在较高作业性能下进行持续性工作。对关键零部件进行了结构参数设计,通过离散元仿真和台架试验获取并验证了不同结构的供种轮较优工作区间,同时对波动变量供种模型性能进行了试验验证。试验结果表明,新型供种轮能够通过改变自身结构在供种速度 250 ~ 1 500 g/min 范围内将供种速度变异系数保持在 20% 以下。优化后新型波动变量供种控制模型将使供种速度以波动变量供种的方式进行平滑变化,在供种速度 500 ~ 1 500 g/min 范围内围绕供种需求进行 100 g/min 左右幅度的波动供种,满足玉米精量播种的技术要求。

关键词: 玉米高速精量排种器; 气送式; 供种系统
中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2023)S1-0066-10

Design and Experiment of Intelligent Seed Supply System of Air-assisted High Speed Precision Maize Seed Metering Device

GAO Xiaojun　YU Laiyuan　WU Xiaopeng　HUANG Yuxiang　YAN Xiaoli
(*College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Aiming at the problem that the seed quantity of the high speed precision seed discharging device can not maintain the best working state due to the fluctuation of the seed quantity in the device, a technical idea was put forward to improve the structure of seed feeding device and optimize seed feeding control model. An intelligent seed supply system was designed, which adopted a seed supply wheel structure with replaceable wheels and a wave variable supply mode based on sine function. The fluctuation amplitude of seed supply speed was adjusted in real time according to the seed supply effect, so as to keep the seed quantity in the seed discharge device in a good range and ensure the continuous work of the seed discharge device under high operating performance. The structural parameters of the key components were designed, and the advantageous operating intervals of thetype seed feeding wheel with different structures were obtained and verified by discrete element simulation and bench test. The experimental results showed that the type of seed feeding wheel could maintain the variation coefficient of seed feeding speed below 20% in the range of 250 ~ 1 500 g/min by changing its own structure. After optimization, the type of fluctuation variable seed supply control model would make the seed supply rate change smoothly in the way of fluctuation variable seed supply, and carry out the fluctuation seed supply in the range of 500 g/min to 1 500 g/min around the supply demand. The research result can meet the technical requirements of corn precision sowing.

Key words: high speed precision maize seed metering device; air-assisted; seed supply system

收稿日期: 2023-06-30　修回日期: 2023-08-26
基金项目: 国家自然科学基金项目(52205283)、中国博士后科学基金项目(2022M722609)和陕西省重点研发计划项目(2023-YBNY-204)
作者简介: 高筱钧(1990—),男,副教授,主要从事农业机械装备与计算机测控研究,E-mail: gxj_1234@126.com

0　引言

玉米是我国重要的主粮之一，是畜牧业、养殖业、水产养殖业等的重要饲料来源，也是食品、医疗卫生、轻工业、化工业等不可或缺的原料之一。随着我国农业生产方式正在向机械化、设施化方向发展，玉米播种精量化、单粒化、丸粒化已经成为发展趋势。高性能的高速精量播种机是得到优良播种质量的有效方式[1-2]，其可有效地节约种子、减少田间作业次数，既降低播种成本又提高产量[3-4]。

气力式排种系统具有精度高、不伤种、通用性强、高速高效和装种方便等优点[5-8]，已成为国内外播种机排种器发展的主要趋势[9-11]。但其充种形式均采用重力充种，在高速作业情况下特别是在充种过程对于玉米这种非类圆形种子的适应性较差，难以实现有效填充，易造成漏播率高。气送式高速玉米精量排种器[12]，其特点在于利用高速作业产生的离心力进行充种与清种，采用气送喂种及型孔插件和护种板组合结构，将原本高速作业产生的不利条件转变为有利条件，从根本上解决传统形式下高速作业时充种时间短难以充种的问题。

气送式高速玉米精量排种器采用定量供种的方式进行供种，不能根据实际排种效果、配合排种器工作转速调节供种量，致使排种装置无法维持最佳作业性能、排种合格率产生波动的问题。

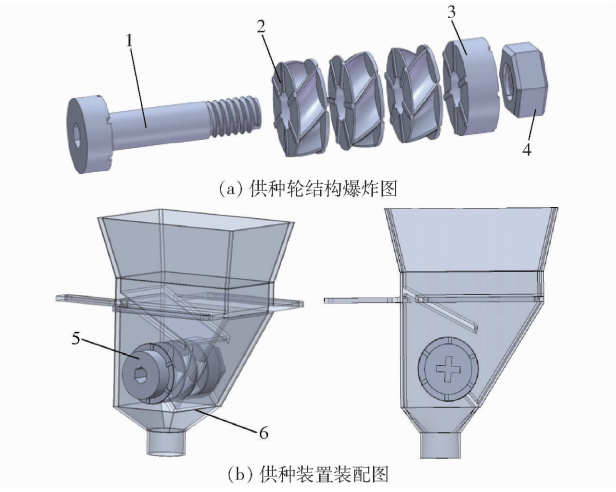
本文设计一种可应用于气送式玉米高速精量排种器的智能供种系统，从保证排种精度与稳定性达到实际使用要求。

1　供种装置结构优化设计

1.1　供种装置结构与工作原理

供种轮作为气送式玉米高速精量排种装置供种系统的关键执行部件，对供种效果起着重要作用。本文采用优化后的变量供种方式进行供种，由于供种轮在不同供种需求下供种稳定性的要求较高，直槽式供种轮供种脉冲性较强，供种均匀性无法满足变量供种要求，而斜槽式供种轮虽具有更良好的供种均匀性[12]，但只有在其适宜工作转速区间内才有较好的工作性能[13]。为了降低供种轮工作时的脉动效应，改善在不同工作条件下的供种效果，本文基于斜槽式供种轮的结构优化设计一种新型供种轮，并设计了配套使用的种箱结构。可替换轮片的新型供种轮主要由轮轴、螺旋凹槽轮片、无凹槽轮片和固定螺母组成，如图 1a 所示。图 1b 为供种装置装配图。

传统结构供种轮在供种时，由于供种轮每转一圈所供种子数量固定，供种轮供种速度与转速呈正相关，所以当供种需求较大时，供种轮转速也会较大，导致种子破损率增大，同时也会导致种子无法顺利落入供种轮凹槽内而出现堵塞或漏充现象，而当供种需求较小时，供种轮转速也会较小，导致一定时间段内供种量出现脉动现象，无法满足变量供种需求。根据以上原理分析，从降低供种轮供种脉动性，提高供种系统在不同作业条件下应对不同供种需求时的适应性出发，本文提出的可替换轮片的新型供种轮结构可以通过更换供种轮转轴上的轮片种类来调整供种轮每转一圈的供种数量，实现在供种轮转速保持在合理区间的前提下供种系统仍能满足不同供种需求。



(a) 供种轮结构爆炸图

(b) 供种装置装配图

图 1　供种装置结构示意图

Fig. 1　Structure diagrams of seed feeding device

1. 轮轴　2. 螺旋凹槽轮片　3. 无凹槽轮片　4. 固定螺母　5. 供种轮　6. 种箱

1.2　供种装置关键零部件结构设计

1.2.1　玉米种子几何特性

为了提高供种轮对玉米种子的适应性，在对供种轮进行优化设计时，首先需要得知玉米种子尺寸，选取在西北主产区区域播种较为广泛的郑单 958 未分级玉米种子为对象，测量并统计其长度 l_0、宽度 w_0 和厚度 t，如图 2 所示。

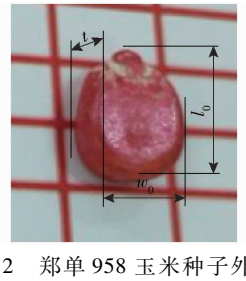


图 2　郑单 958 玉米种子外形

Fig. 2　Zhengdan 958 maize seed appearance

通过测量并计算得到玉米种子外形轮廓长度平均值为 11.13 mm、宽度平均值为 8.71 mm、厚度平

均值为 5.70 mm。

1.2.2 螺旋凹槽轮片

螺旋凹槽轮片是供种轮供种时的主要工作部件,其结构参数对新型供种轮的性能起着重要作用,主要包括轮片长度 l、轮片半径 R、凹槽深度 h、凹槽宽度 w、轮片挡板厚度 d、螺旋凹槽倾斜角 θ,如图 3 所示。

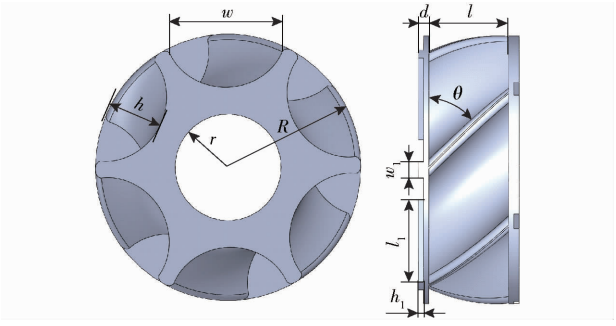


图 3 螺旋凹槽轮片结构示意图

Fig. 3 Spiral groove wheel structure diagram

根据玉米种子外形尺寸,为确保螺旋凹槽内能够充上种子,不漏充,螺旋凹槽深度 h 应大于 1 个玉米种子宽度,凹槽宽度 w 应大于 1 个玉米种子长度,轮片长度 l 应大于 2 个玉米种子宽度,为了防止供种时种子颗粒聚集在凹槽一侧,确保种子在周向上不间断,在轮片两端设计轮片挡板。挡板厚度 d(即相邻轮片的间隔)应小于 1 个玉米种子厚度,防止供种时玉米种子发生结拱现象。

供种轮凹槽螺旋倾角 θ 对供种轮的供种均匀性有着明显影响[14],当 θ 大于 30°、小于 90°时较为合理,能够体现出螺旋凹槽式供种轮的性能特性。

综上所述,可替换轮片主要结构参数应该满足

$$\begin{cases} h > w_0 \\ l > 2w_0 \\ w > l_0 \\ d < t \\ 30° < \theta < 90° \end{cases} \tag{1}$$

根据式(1)和玉米种子外形尺寸,综合考虑,供种轮片凹槽深度 h 取 10 mm,供种轮片凹槽宽度 w 取 20 mm,轮片挡板厚度 d 取 2 mm,螺旋倾角 θ 取 45°。由于供种轮供种的均匀性随着工作转速的提高而提高,为了使供种轮工作转速尽可能的大些,应尽量减小供种轮半径 R,综合考虑螺旋凹槽轮片结构,R 取 25 mm,r 取 20 mm。

此外,为了保证供种连续性,安装在轮轴上的两个相邻的螺旋凹槽轮片间的凹槽应首尾相连接在同一螺旋线上。因此本设计在轮片挡板外侧分别设计有径向键和径向键槽,在能够承载工作扭矩的前提下确保轮片之间周向相对位置的固定,取键长 l_1 = 15 mm,键宽 w_1 = 3 mm,键高 h_1 = 1 mm。

1.2.3 轮轴

轮轴是可替换轮片与种箱间的连接部件,传递电机向轮片的工作扭矩,起到主要的载荷作用,因此轮轴需要拥有足够的强度,同时根据新型供种轮可替换轮片的结构特性,轮轴结构须方便轮片的拆卸和替换,提高工作效率。基于以上考虑,设计一种头部带有径向键槽、尾部带有螺纹结构的新型轮轴,如图 4 所示。轮轴长 l_2 取 105 mm,轮轴头部直径 D_1 取 40 mm,中心六边形通孔尺寸 d_1 取 3 mm。为了保证轮片在轮轴上的轴向固定,轮轴尾部螺纹牙型角 γ 取 90°,螺距 P 取 4 mm,接触高度 h_2 取 1.5 mm。

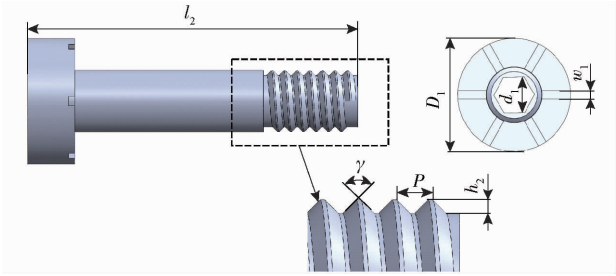


图 4 轮轴结构示意图

Fig. 4 Axle structure diagram

2 变量供种数学模型建立

在气送式高速精量排种器工作时,若以定量供种方式进行供种,则当供种速度大于排种器排种速度时,会导致排种器的型腔内部存种量越来越多,从而导致播种重播率上升,当供种速度小于排种器排种速度时,会导致排种器型腔内部种子量越来越少,最终导致播种漏播率上升。为了使排种器型腔内的种子数量在最佳范围内保持动态平衡,同时避免因供种轮转速突变引起的供种装置振动和玉米种子破损,影响供种效果。需要使用特定的变量供种数学模型控制供种装置进行变量供种,本研究提出一种以正弦函数形式进行波动变量供种的数学模型,避免了供种轮转速突变的状况,提高了变量供种连续性。波动变量供种方案为:供种系统供种速率按照一定的周期和变化倍率,以排种器排种速率为基准进行符合正弦函数的波动变化,如图 5 所示。

相比于通过速率突变实现高低变量供种的方式,波动供种模型使速率变化更平稳,减轻了速率突变引起的装置振动和排种速度突变的现象,从而实现排种器内种子量在排种器较好的作业性能范围内稳定波动。在优化后的波动变量供种模型中,供种轮转速变化规律满足

$$v = \left(1 + \alpha \sin \frac{2\pi t}{T}\right) m_p \tag{2}$$

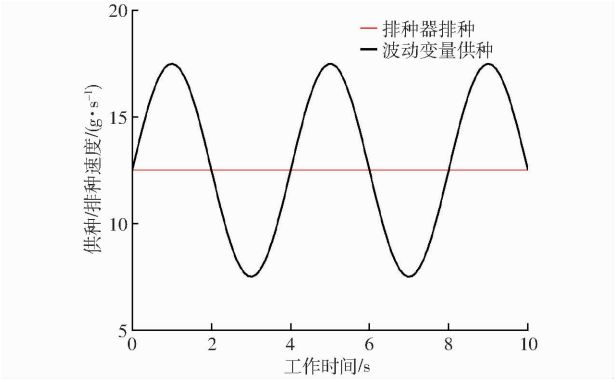


图 5　以正弦函数为基础的波动供种速度曲线

Fig. 5　Wave supply velocity curve based on sine function

式中　v——供种速度，g/s

α——供种变化倍率系数

t——供种时间，s

T——供种速率变化周期，s

m_p——排种器排种速度，g/s

采用优化后的波动变量供种方案时，控制供种轮转速围绕排种器排种速度进行符合正弦函数的规律变化，当排种器型腔内种子量维持在最佳范围内，实际供种效果接近最佳状态时，控制波动幅度 α 减小，使供种轮转速波动量减小，保持在最佳供种状态。当实际供种效果不在最佳状态时，控制 α 增大，使供种轮转速波动增大，以波动变量供种的方式使排种器尽快回归较好的作业状态。为达成以上目的，需要对波动变量供种数学模型进行进一步的修正，为了使得排种器内存种量在波动供种中尽快回归最佳值，令供种系统在半个周期内的供种波动量等于排种器型腔内的存种检测量与理想存种量的偏差值，如图 6 所示。

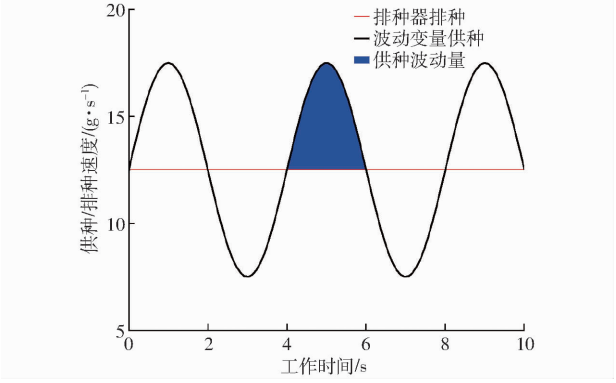


图 6　供种波动量示意图

Fig. 6　Schematic diagram of supply fluctuation

由上述分析可知，供种变化倍率系数 α 变化规律需要满足

$$\int_0^{\frac{T}{2}} \alpha m_p \sin\frac{2\pi t}{T}\mathrm{d}t = W|a-a'| \tag{3}$$

式中　a——排种器存种量检测值，个

a'——排种器存种量理论最优值，个

W——种子千粒质量，g

计算式(3)并整理得

$$\alpha = \frac{\pi W|a-a'|}{m_p T} \tag{4}$$

联立式(2)、(4)，得到波动变量供种数学模型为

$$v = m_p + \frac{\pi W|a-a'|}{T}\sin\frac{2\pi t}{T} \tag{5}$$

考虑到实际供种作业情况，需要在存种量偏小时加大供种速度、在存种量偏多时减小供种速度，对式(5)的符号进行调节，得

$$v = m_p + \frac{\pi W(a'-a)}{T}\left|\sin\frac{2\pi t}{T}\right| \tag{6}$$

由式(6)可以看出，改进后变量供种模型能够围绕排种器供种需求进行平滑波动变量供种，且能够根据排种器型腔内部存种量实时调节波动供种参数，达到智能变量供种的目的。

3　智能供种控制系统设计

3.1　整体结构设计

根据气送式高速精量排种系统的结构特点和作业环境，设计变量喂入式智能供种控制系统的总体方案。系统框图如图 7 所示，该控制系统包括：电源模块、充种量检测模块、控制器、电机及其驱动模块以及人机交互模块。电源模块的作用是为整个控制系统提供电力，包括控制器所需的 24 V 直流电和电机驱动器所需的 48 V 直流电。人机交互模块的作用是实现人机交互功能。在作业过程中，操作员可以通过人机交互界面输入播种作业参数。这些参数通过串口发送给控制器。控制器根据接收到的播种作业参数和系统控制要求，来控制和调节供种装置的驱动电机，从而实现对供种过程的控制。供种系统和排种器总体结构如图 8 所示。

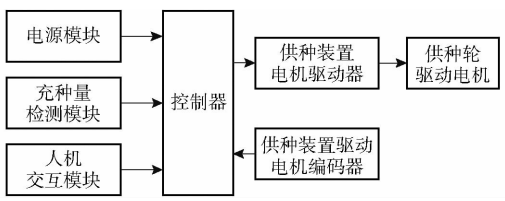


图 7　控制系统结构框图

Fig. 7　Control system structure of block diagram

3.2　充种量检测模块设计

本文需要准确检测从供种装置到排种器的充种管道内种子流量和投种区的排种流量，从而计算排种器型腔内的种子数量，同时确保检测装置不会对排种效果产生影响。在气送式玉米高速精量排种器工作过程中，平均每秒有 20 粒种子通过供种管道，

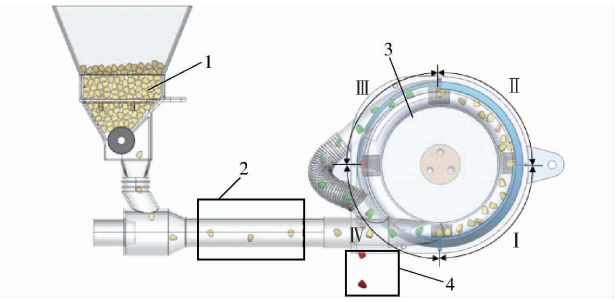


图 8 供种与排种系统总体结构图

Fig. 8 Structure diagram of seed supply and discharge system

1. 供种装置 2. 供种量检测区域 3. 排种器 4. 排种量检测区域 Ⅰ. 充种区 Ⅱ. 携种区 Ⅲ. 清种区 Ⅳ. 投种区

为应对种子通过检测面时的多种种子分布的复杂情况,减小检测误差,采用两对矩阵光纤式传感器共同检测的种子流量检测方法。传感器分布方式如图 9 所示。检测部分文丘里管为透明材料,在台架试验中,采用透明光敏树脂打印该部分文丘里管,以方便检测模块统计管中经过的种子流量。

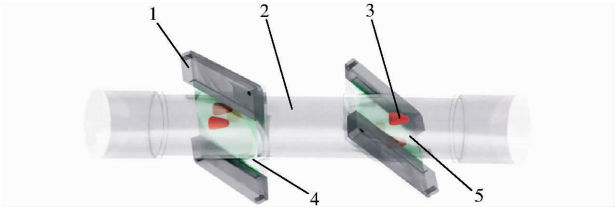


图 9 充种量传感器布置

Fig. 9 Filling quantity sensor layout

1. 矩阵光纤式传感器 2. 供种管道 3. 种子 4. 检测面 A 5. 检测面 B

检测模块外部中断程序结构设计如图 10 所示,当有种子通过检测面时,产生中断信号,单片机立刻检查该信号发送源,对控制系统主程序中的进种量和排种量数据进行调节,同时记录该种子信息,用以

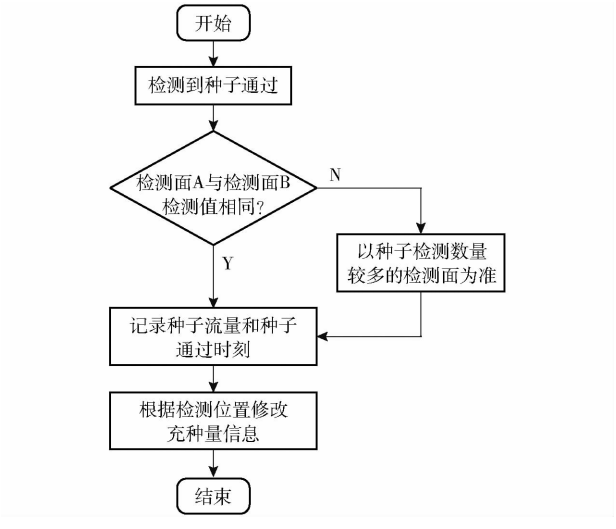


图 10 检测模块中断程序流程图

Fig. 10 Detection module interrupt program structure diagram

计算排种器中的存种量。

3.3 控制系统程序设计

控制系统程序设计是实现系统各个功能的重要环节,包括检测数据处理、电机转速调节等控制程序。采用 Keil MDK 开发工具,使用 C 语言对系统各模块进行开发,之后由主程序调用执行各程序模块实现预期功能。

控制系统主程序的主要功能是在控制器上电后对系统的硬件进行初始化以及程序所需的变量声明,然后调用检测模块读取排种器中的存种量,根据排种器当前的工作速度以及规定的波动周期值,通过调用电机调速模块子程序实现变量供种,系统主程序流程图如图 11 所示。

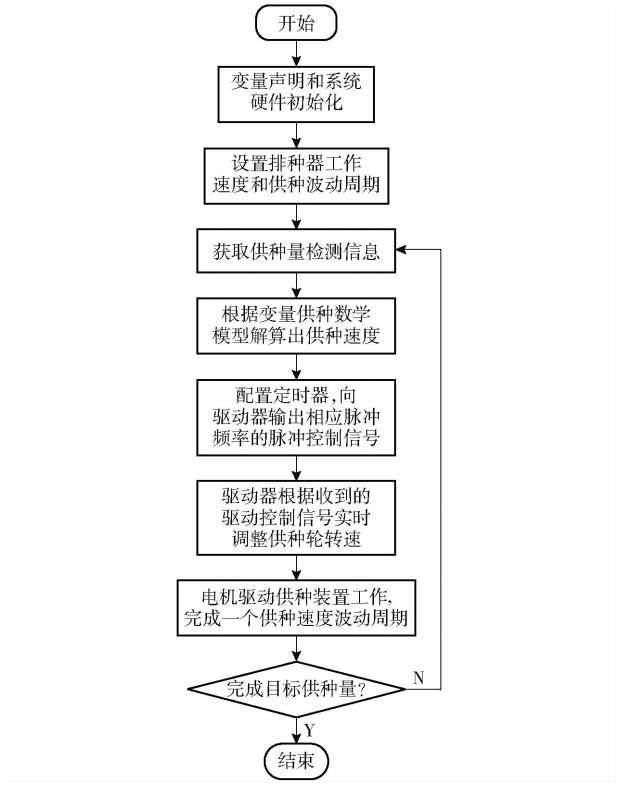


图 11 控制系统主程序流程图

Fig. 11 Control system main program diagram

4 试验

4.1 供种装置仿真试验

4.1.1 玉米种子籽粒建模

为了保证离散元仿真结果的准确性,根据玉米籽粒外形特征在 SolidWorks 中对玉米种子进行三维建模,然后将模型导入离散元仿真软件 EDEM 中进行多个球面组合填充,通过调节填充球面数量、大小和位置使得球面组成的外轮廓与玉米籽粒十分接近[15-16],如图 12 所示。

4.1.2 仿真流程与数据处理

为保证仿真试验结果的可靠性,根据加工模型

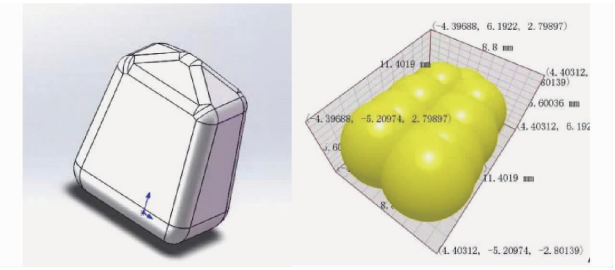


图 12　玉米种子三维模型

Fig. 12　Three dimensional model of corn seed

时采用的材料以及相关文献确定供种装置和玉米种子的物理属性[17]，如表 1 所示。

表 1　离散元仿真所需物理和力学特性参数

Tab. 1　Physical and mechanical parameters required for discrete element simulation

项目	参数	数值
玉米籽粒	泊松比	0.4
	剪切模量/Pa	1.37×10^{8}
	体积密度/(kg·m^{-3})	1.197
供种装置	泊松比	0.5
	剪切模量/Pa	1.77×10^{8}
	密度/(kg·m^{-3})	1.18
种子-种子	碰撞恢复系数	0.182
种子-供种装置		0.709
种子-种子	静摩擦因数	0.034
种子-供种装置		0.459
种子-种子	动摩擦因数	0.002 0
种子-供种装置		0.093 1

根据实际作业情况将装有不同种类轮片的供种轮最高转速分别设定为 30、60、90、120 r/min 并依次进行试验，为使仿真试验接近实际工作情况，各个试验中的供种轮均需经过 0.2 s 的静止时间等待种子颗粒填满种箱，再经过 0.5 s 的加速时间达到设定的最高转速，最后以匀速状态进行供种，如图 13 所示。试验结果如表 2 所示。



图 13　供种装置模型导入与离散元仿真

Fig. 13　Model import and discrete element simulation

将表 2 中数据导入 Origin 中进行绘图，得到在不同工作转速下，装有不同数量凹槽轮片的新型供种轮的实际供种速度，如图 14 所示。

由图 14 可知，在转速一定时，供种轮装有的螺旋凹槽轮片数量越多，折线斜率越大。装有不同数量螺旋凹槽轮片的新型供种轮的供种速度随着转速增大而增大，且折线斜率随着转速增大而减小，原因可能是当供种轮在种箱中的转速较快时，种箱内种子被扰动的程度将会增大，导致种子难以顺利落入供种轮槽中，进而影响供种速度。

表 2　新型供种轮在不同转速下的实际供种速度

Tab. 2　Actual seed feeding speed of seed feeding wheel at different speeds

试验序号	因素		供种速度/(g·min^{-1})
	供种轮凹槽轮数量	供种轮转速/(r·min^{-1})	
1	1	30	99.60
2	1	60	209.95
3	1	90	269.22
4	1	120	318.14
5	2	30	251.47
6	2	60	512.84
7	2	90	623.34
8	2	120	737.39
9	3	30	421.85
10	3	60	686.74
11	3	90	803.21
12	3	120	898.95
13	4	30	588.51
14	4	60	926.76
15	4	90	1 269.44
16	4	120	1 410.48

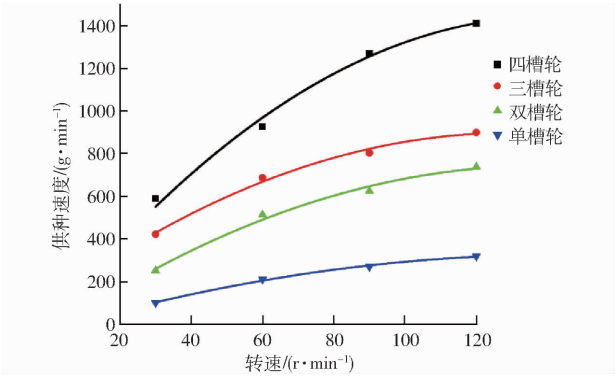


图 14　供种速度与供种轮转速拟合曲线

Fig. 14　Feed speed and feed wheel speed fit curves

根据试验数据，在转速一定的情况下，供种速度与槽轮数也不为线性关系，原因在于新型供种轮上的各个轮槽片在供种时具有空间位置的区别，位于轮轴中部的轮槽更容易充种，位于轮轴端部的轮槽则因为有一侧贴靠种箱壁而更难以充种，如图 15 所示。

通过监测供种轮供种速度的变异系数来衡量供种轮供种均匀性，若收集器内玉米种子增加量变异系数越大，则说明供种轮供种均匀性越差[18]。从供种速度和工作转速之间的理论关系来控制供种轮转速，使供种装置按照特定的供种速度工作，进行仿真试验，选取供种轮工作较为平稳的时间段，以该时间段收集器内玉米种子的增加量计算装有不同凹槽轮

片数的供种轮在不同供种速度下的变异系数,评估供种均匀性,结果如表 3 所示。

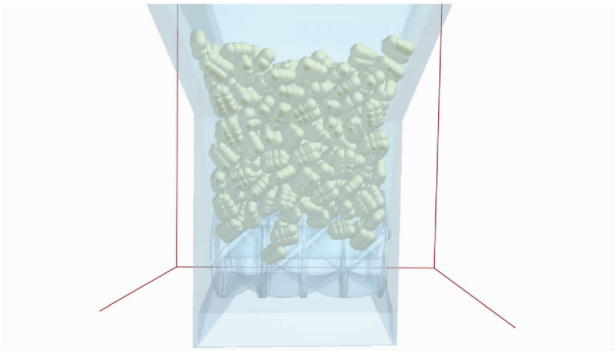


图 15 供种轮片在供种过程中的相对位置

Fig. 15 Relative position of feeding wheel during feeding process

表 3 新型供种轮在不同供种速度下的供种变异系数

Tab. 3 Variation coefficient of seed feeding wheel at different seed feeding speeds

试验序号	因素		变异系数/%
	供种轮凹槽轮数量	供种速度/(g·min^{-1})	
1	1	250	17.81
2	1	500	25.87
3	1	750	41.62
4	1	1 000	77.28
5	2	250	24.22
6	2	500	15.31
7	2	750	18.01
8	2	1 000	21.72
9	2	1 250	24.26
10	2	1 500	27.04
11	3	250	25.44
12	3	500	21.32
13	3	750	14.61
14	3	1 000	10.96
15	3	1 250	12.94
16	3	1 500	15.14
17	4	250	34.28
18	4	500	23.23
19	4	750	19.33
20	4	1 000	16.78
21	4	1 250	12.20
22	4	1 500	10.68

安装了不同轮片的新型供种轮在不同供种速度下变异系数变化曲线如图 16 所示。由图 16 可得,在供种速度大于 1 200 g/min 时,装有 4 个凹槽轮片结构的供种轮供种量变异系数最低,供种均匀性最好。同理,在供种速度为 700 ~ 1 200 g/min 时,将新型供种轮轴上带有螺旋凹槽轮片数量改为 3,并加装 1 个无凹槽轮片可提高供种效果,在供种速度为 300 ~ 700 g/min 时,将供种轮上凹槽轮片数量更改为 2,无凹槽轮片数量更改为 2,可得最佳供种效果,在供种速度小于 300 g/min 时,则建议只在新型供种轮上保留 1 个螺旋凹槽轮片,并安装 3 个无凹槽轮片。依照以上方法通过更换新型供种轮上的轮片,可在较大的供种速度范围内将供种装置的供种速度变异系数维持在较低值,使供种装置拥有较高的供种均匀性。

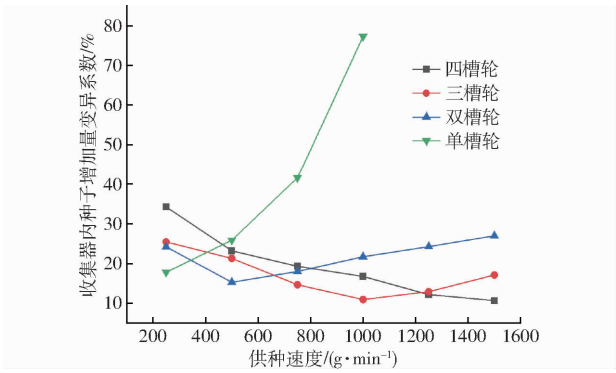


图 16 装有不同轮片的新型供种轮供种性能对比

Fig. 16 Comparison of performance of a type seed feeding wheel with different blades

4.2 台架试验

4.2.1 设备和试验方法

为验证离散元仿真试验所得结论的准确性,对智能供种系统进行台架试验验证,如图 17 所示。选择 STM32 单片机作为本研究的控制器[19-23]、对射式矩阵光纤式传感器作为本研究的测速模块、普菲德 86HSE12N 型闭环步进电机和 HBS86H 型驱动器作为排种器的驱动模块。利用 STM32 的定时器的 PWM 功能控制电机转速。最后,对人机交互模块程序进行设计,编写触控串口屏与控制器之间的通讯程序,实现作业参数的显示与控制功能。

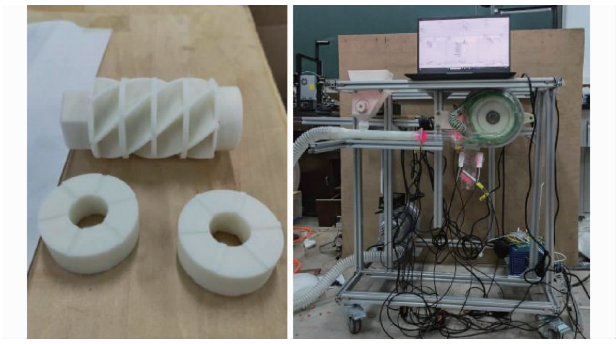


图 17 试验设备图

Fig. 17 Experiment equipment

4.2.2 供种轮性能试验验证

首先测量在指定转速下供种轮的实际供种量和理论供种量的符合程度,再测量在一定供种速度下不同结构的供种轮的供种量变异系数,测量间隔为 3 s,单次试验测量时间为 1 min,供种量通过使用精

度为 0.001 g 的电子秤称量放置在供种装置下方容器内收集到的玉米种子质量，如图 18 所示。

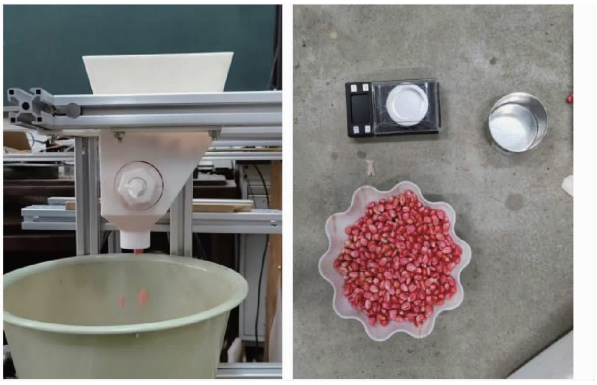


图 18　试验过程图

Fig. 18　Experiment process

台架试验结果如表 4 所示。由表 4 可知，供种轮的实际供种速度、供种量变异系数与理论数值基本吻合，且按照仿真试验结果根据不同的供种要求替换了相应的轮片结构后，在供种速度 250 ~ 1 500 g/min 的范围内容器内种子增加量变异系数在始终保持在 20% 以下，符合生产需求。

表 4　台架试验数据

Tab. 4　Experiment data

理论供种速度/(g·min^{-1})	实际供种速度/(g·min^{-1})	工作转速/(r·min^{-1})	螺旋凹槽轮片数量	容器内种子增加量变异系数/%
250	231.40	90	1	18.55
500	524.52	90	2	13.29
750	810.60	90	3	12.19
1 000	938.95	120	3	14.07
1 250	1 177.55	90	4	10.59
1 500	1 346.67	120	4	10.32

4.2.3　波动供种数学模型试验验证

为验证波动供种数学模型准确性，在不同作业速度和不同充种情况下分别对排种器供种系统的工作性能进行台架试验。采用两对矩阵光纤式传感器共同检测的种子流量检测方法。在台架试验中，采用透明光敏树脂打印检测模块部分文丘里管，以方便检测模块统计管中经过的种子流量，如图 19 所示。

为了避免供种速度过于频繁变化导致供种均匀性变差，供种波动变速周期取 7 s。试验结果如表 5 所示。由表 5 可知，当不同作业速度下的排种器型腔内存种量偏离理想区间时，波动供种数学模型能够控制供种系统做出相应的工作状态变化，当排种器存种量过多时，供种系统将放缓供种速度，当排种器存种量过少时，供种系统将加快供种速度，在供种速度 500 ~ 1 500 g/min 的范围内围绕供种需求进行

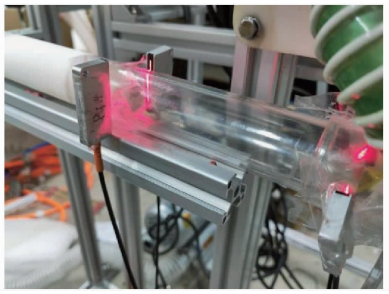


图 19　存种量检测模块实物图

Fig. 19　Seed filling quantity test module

表 5　新型供种轮在不同转速下的实际供种速度

Tab. 5　Actual seed feeding speed of seed feeding wheel at different speeds

试验序号	因素		供种速度/(g·min^{-1})
	排种器排种速度/(g·min^{-1})	存种量检测值与目标存种量差值/g	
1	750	-20	866.51
2	750	-10	801.46
3	750	0	741.43
4	750	10	720.48
5	750	20	646.07
6	1 000	-20	1 113.41
7	1 000	-10	1 065.57
8	1 000	0	1 021.36
9	1 000	10	961.43
10	1 000	20	886.86
11	1 250	-20	1 356.28
12	1 250	-10	1 297.30
13	1 250	0	1 252.22
14	1 250	10	1 195.89
15	1 250	20	1 148.95
16	1 500	-20	1 624.72
17	1 500	-10	1 565.65
18	1 500	0	1 510.60
19	1 500	10	1 446.39
20	1 500	20	1 386.81

100 g/min 左右幅度的波动供种，将排种器型腔存种量维持在最优区间，使排种器在不同作业速度下都能够保持较好的排种性能。

5　结论

（1）将供种装置的核心部件供种轮优化为可替换轮片的新型结构，并采用离散元仿真方法对新型供种轮的性能进行了研究并通过台架试验进行了验证，在供种速度约大于 1 200 g/min 时，装有 4 个凹槽轮片结构的供种轮性能最佳。供种速度为 700 ~ 1 200 g/min 时，装有 3 个凹槽轮片结构的供种轮性能最佳。在供种速度为 300 ~ 700 g/min 时，装有 2 个凹槽轮片结构的供种轮性能最佳。在供种速度小于 300 g/min 时，装有 1 个凹槽轮片结构的供种轮性能最佳。在不同的生产要求下通过更换新型供种

轮上的轮片,可以提高供种装置供种均匀性。

(2)将高低供种模型优化为智能波动供种模型,将通过速度突变进行高低变量供种的控制方式优化为以正弦函数进行速率平滑变化的新型控制方式,此外,通过对波动幅度值的实施调控,新型供种模型还能够根据传感器检测出的排种器内种子量而改变供种速度波动量,实现了智能变量供种。

(3)对气送式高速精量排种器智能供种系统中的控制系统进行了选型设计,根据系统性能要求,选用闭环步进电机作为供种装置的驱动电机,STM32单片机作为控制器,矩阵光纤式传感器作为检测模块,并设计了控制程序,将各模块做了整合设计。

参 考 文 献

[1] 李国林,宋炜,毛俐. 国内外几种主要排种器的特点[J]. 农业科技与装备,2011(8):70 - 71,73.
LI Guolin, SONG Yi, MAO Li. Characteristics of several main seed harvesters at home and abroad[J]. Agricultural Technology and Equipment,2011(8):70 - 71,73. (in Chinese)

[2] 贾洪雷,赵佳乐,郭明卓. 双凹面摇杆式排种器设计与性能试验[J]. 农业机械学报,2015,36(1):60 - 65.
JIA Honglei, ZHAO Jiale, GUO Mingzhuo. Design and performance test of double concave rocker seed harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,36(1):60 - 65. (in Chinese)

[3] ESS D R, HAWKINS S E, YOUNG J C. Evaluation of the performance of belt metering system for soybeans planted with graindrill[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005, 21(6): 965 - 969.

[4] STEFFEN R, WOLFF R, ILTIS R. Effect of two seed treatment coatings on corn planter seeding rate and monitor accuracy[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1999, 15(6): 605 - 608.

[5] KUMAR V J F, DURAIRAJ C D. Influence of head geometry on the distributive performance of air-assisted seed drills[J]. J. Agric. Engng. Res., 2000, 75(1): 81 - 95.

[6] 祁兵,张东兴,崔涛. 中央集排气送式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(18):8 - 15.
QI Bing, ZHANG Dongxing, CUI Tao. Design and experiment of corn precision seed discharge device with central collecting air feed[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(18):8 - 15. (in Chinese)

[7] 杨慧. 气流输送式排种系统性能试验研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2014.
YANG Hui. Experimental study on performance of pneumatic seeding system[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences,2014. (in Chinese)

[8] 王磊,廖宜涛,廖庆喜. 气送式油菜播种机集排器供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(2):75 - 85.
WANG Lei, LIAO Yitao, LIAO Qingxi. Design and experiment of seed feeding device of air feed type cole seed planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(2):75 - 85. (in Chinese)

[9] SUOMI P, OKSANEN T. Automatic working depth control for seed drill using ISO 11783 remote control messages[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2015,116:30 - 35.

[10] YAZGI A, DEGIRMENCIOGLU A. Optimisation of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology[J]. Biosystems Engineering,2007,97(3):347 - 356.

[11] KRISHNA C V, JAS A, TOUBA N A. Achieving high encoding efficiency with partial dynamicLFSR reseeding[J]. ACM Trans. Design Autom. Electr. Syst.,2004,9:45 - 87.

[12] 高筱钧,徐杨,张东兴,等. 气送式高速玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(23):9 - 20.
GAO Xiaojun, XU Yang, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of air-assisted high speed precision maize seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(23):9 - 20. (in Chinese)

[13] 田立权,王金武,唐汉,等. 螺旋槽式水稻穴直播排种器设计与性能试验[J]. 农业机械学报,2016,47(5):46 - 52.
TIAN Liquan, WANG Jinwu, TANG Han, et al. Design and performance test of spiral-channel direct seeding device for rice hole[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(5):46 - 52. (in Chinese)

[14] SUN Jianfeng, CHEN Huaming, DUAN Jieli, et al. Mechanical properties of the grooved-wheel drilling under multivariate interaction influenced based on 3D printing and EDEM simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2020,172: 105329.

[15] 顿国强,于春玲,杨永振,等. 外槽轮排肥离散元仿真及排肥舌参数优化[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2018,44(6):661 - 665.
DUN Guoqiang, YU Chunling, YANG Yongzhen, et al. Discrete element simulation and optimization of fertilizer discharge tongue parameters of outer channel wheel[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition),2018,44(6):661 - 665. (in Chinese)

[16] 丁力. 辅助充种高速气吸式精量排种器设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2020.
DING Li. Design and experimental study of precision seed discharge device with high speed pneumatic auxiliary filling[D]. Beijing: China Agricultural University,2020. (in Chinese)

[17] 丁力,杨丽,张东兴,等. 气吸式玉米排种器清种机构参数化设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(9):47 - 56.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Parametric design and experiment of seed clearing mechanism of air-suction

corn seed feeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(9):47 - 56. (in Chinese)
[18] JB/T 9783—2013　播种机 外槽轮排种器[S].2013.
[19] 韩丹丹.内充气吹式玉米精量排种器仿真优化与试验研究[D].北京:中国农业大学,2018.
HAN Dandan. Simulation optimization and experimental research of internal aerated blowing precision seed discharge device for corn[D]. Beijing: China Agricultural University,2018. (in Chinese)
[20] 闫青.电控排种系统设计及试验研究[D].保定:河北农业大学,2020.
YAN Qing. Design and experimental research of electronic control seeding system[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei,2020. (in Chinese)
[21] 刘振威.印刷与包装设备 PLC 控制共性模块化软件研究[D].沈阳:东北大学,2011.
LIU Zhenwei. Research on PLC control common modular software for printing and packaging equipment[D]. Shenyang: Northeastern University,2011. (in Chinese)
[22] 韦尔密.单片机在智能电子设备中的应用研究[J].科学大众,2020(3):139.
WEI Ermi. Research on the application of single chip microcomputer in intelligent electronic equipment[J]. Science Popular, 2020(3):139. (in Chinese)
[23] 蓝土庆,郑光熙.基于单片机的激光投影图像抑噪控制系统[J].激光杂志,2020,41(9):196 - 200.
LAN Tuqing,ZHENG Guangxi. Laser projection image noise suppression control system based on single chip computer[J]. Laser Journal, 2019,41(9):196 - 200. (in Chinese)

(上接第 56 页)

[22] 杨庆璐, 李子涵, 李洪文, 等. 基于 CFD - DEM 的集排式分肥装置颗粒运动数值分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8):81 - 89.
YANG Qinglu, LI Zihan, LI Hongwen, et al. Numerical analysis of particle motion in a centralized fertilizer distribution device based on CFD - DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 81 - 89. (in Chinese)
[23] YANG Shiliang, LUO Kun, ZHANG Ke, et al. Numerical study of a lab-scale double slot-rectangular spouted bed with the parallel CFD - DEM coupling approach[J]. Powder Technology, 2015, 272:85 - 99.
[24] LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LIAO Qingqi. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM - CFD coupling approach for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 131:29 - 39.
[25] GAO Xiaojun, XIE Guanfu, XU Yang, et al. Application of a staggered symmetrical spiral groove wheel on a quantitative feeding device and investigation of particle motion characteristics based on DEM[J]. Powder Technology, 2022, 407: 117650.
[26] 张鹤, 刘马林, 黄志勇, 等. 大颗粒与壁面碰撞的离散单元法模拟与分析[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(12):2212 - 2217.
ZHANG He, LIU Malin, HUANG Zhiyong, et al. Simulation and analysis of large particle wall collision using discrete element method[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(12): 2212 - 2217. (in Chinese)