

双齿轮式排肥器设计与试验

顿国强¹ 于春玲¹ 郭艳玲¹ 纪文义² ISLAM K R³ 杜佳兴⁴

(1. 东北林业大学机电工程学院, 哈尔滨 150040; 2. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030;
3. 俄亥俄州立大学土壤、水和生物能源中心, 派克顿 45661; 4. 黑龙江省农业科学院佳木斯分院, 佳木斯 154007)

摘要: 为了提高颗粒肥料的施肥均匀性, 设计了双齿轮式排肥器。利用离散元软件对排肥过程进行仿真分析, 以排肥轮压力角、排肥轮间隙为试验因素, 以排肥均匀度变异系数为排肥效果评价指标, 分析因素对指标的影响。单因素试验结果表明, 排肥轮压力角在 15°~25°, 排肥轮间隙在 4~6 mm, 排肥效果较好; 通过二次通用旋转组合试验, 建立了两个因素与评价指标的回归方程, 试验结果表明, 随排肥轮压力角、排肥轮间隙的增大, 排肥均匀度变异系数均呈现先增大、后减小的趋势, 当排肥轮压力角为 19.52°、排肥轮间隙为 4.7 mm 时, 排肥器具有最优的排肥效果, 此时理论计算和仿真试验的排肥均匀度变异系数分别为 15.30% 和 14.58%, 两者偏差为 0.72 个百分点, 说明回归模型准确。最优结构参数组合下双齿轮式排肥器的台架试验结果表明, 排肥量可通过排肥轮转速线性调节, 排肥均匀度变异系数为 15.42%, 与仿真值及理论值基本一致; 同等条件下外槽轮排肥器的排肥均匀度变异系数为 20.29%, 试验排肥器排肥均匀度变异系数提高了 31.58%, 排肥均匀性得到明显改善。

关键词: 排肥器; 双齿轮式; 渐开线齿轮; 排肥均匀性; 离散元

中图分类号: S224.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)03-0087-10 OSID: 

Design and Experiment of Double-gear Type Fertilizer Apparatus

DUN Guoqiang¹ YU Chunling¹ GUO Yanling¹ JI Wenyi² ISLAM K R³ DU Jiaxing⁴

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China
2. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
3. Soil, Water and Bioenergy Resources Program, The Ohio State University South Centers, Piketon OH 45661, USA
4. Jiamusi Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Jiamusi 154007, China)

Abstract: In order to improve the fertilizer performance, a double-gear fertilizer apparatus was designed. Aiming to optimize the fertilizer performance, the discrete element simulation technology was used. The pressure angle of gear tooth and the interval of fertilizer wheel were taken as test factors. The coefficient of variation of fertilization uniformity was measured as test indicators, and the influence of various factors on the indicators was obtained and analyzed. The results of single factors simulation test showed that fertilizer apparatus had relatively small coefficient of variation of fertilization uniformity. When pressure angle and fertilizer wheel interval was at 15°~25° and 4~6 mm, respectively. According to the results of single factor experiment, a quadratic general rotation unitized design method was conducted, and regression equations of two key structural parameters and coefficient of variation of fertilization uniformity were established. The results showed that coefficient of variation was increased at first, and then decreased with the increase of pressure angle and fertilizer wheel interval. When they were 19.52° and 4.7 mm respectively, coefficient of variation of fertilization uniformity was minimum, in this case, the coefficient of variation of theoretical calculation value and simulation test value were 15.30% and 14.58% respectively, and the deviation was only 0.72 percentage point, the regression model was accurate and credible. In order to validate the regression model established by simulation test and optimization effect of structure parameters, a bench test of double-gear fertilizer apparatus with the

收稿日期: 2019-11-29 修回日期: 2019-12-20
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0201001)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572017BB10)、中央高校建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项资金暨双一流经费项目(41113278)
作者简介: 顿国强(1986—),男,讲师,博士,主要从事农业机械装备研究,E-mail: dunguoqiang1986@163.com
通信作者: 郭艳玲(1962—),女,教授,博士生导师,主要从事机电一体化研究,E-mail: guo.yl@hotmail.com

optimized structure parameters combination of fertilizer wheel was carried out. The results showed that fertilizer discharge flow rate can be adjusted linearly by the speed of fertilizer wheel. The average coefficient of variation was 15.42%, which was basically consistent with simulation test value and theoretical calculation value. Under the same condition, the coefficient of variation of outer groove-wheel fertilizer apparatus was 20.29%. The coefficient of variation of beach test was increased by 31.58%. It obviously improved the fertilization uniformity.

Key words: fertilizer apparatus; double-gear type; involute gear; fertilization uniformity; discrete element

0 引言

化肥用量和施肥均匀性均严重影响着作物的产量,适量的化肥能提高农作物的产量,但过量或是不合理的施用化肥不仅达不到高产、优质的目的,还会降低化肥的利用效果,浪费资源、污染环境^[1-2]。相关学者对精量施肥控制技术做了大量研究^[3-7]。

排肥器是施肥机械的关键部件,目前,国内外设计和研究的排肥器形式主要有外槽轮式、转盘式、离心式、螺旋式、星轮式和振动式等^[8],其中应用最多的是外槽轮式排肥器^[9],其结构简单、操作方便、价格便宜^[10-11],但也存在化肥施用量大、排肥均匀性差等问题,只能使用流动性好的松散化肥和复合粒肥^[12-13]。为了提高排肥器排肥均匀性、控制排肥量,许多学者做了大量研究。顿国强等^[14]通过在外槽轮排肥器下端安装肥料调配装置,有效改善了排肥流量脉动的现象;丁筱玲等^[15]分别以排肥器槽深及施肥速度作为优先控制策略分析了对排肥稳定性的影响,并改进了导流槽的结构;祝清震等^[16-17]分析了槽轮半径、凹槽数目、有效工作长度以及凹槽截面形状对直槽轮式排肥器排肥性能的影响。这些研究成果为施肥装置的进一步优化提供了参考。

为了提高颗粒肥料施肥均匀性,本文设计一种双齿轮式排肥器,分析结构参数对排肥效果的影响,建立排肥过程数学模型,运用离散元法仿真分析不同结构参数对排肥均匀性的影响,优化结构参数,并应用3D打印技术制造最优结构参数组合下的双齿轮式排肥器,与外槽轮排肥器进行对比验证试验,以期对排肥器的进一步优化提供参考。

1 工作原理与结构设计

1.1 结构组成

双齿轮式排肥器的结构主要包括排肥盒、左右渐开线排肥齿轮、左右传动齿轮、排肥口等,如图1所示。其中渐开线排肥齿轮是完成排肥作业的关键部件。

1.2 工作原理

工作前,左右传动齿轮分别固装在左右渐开线

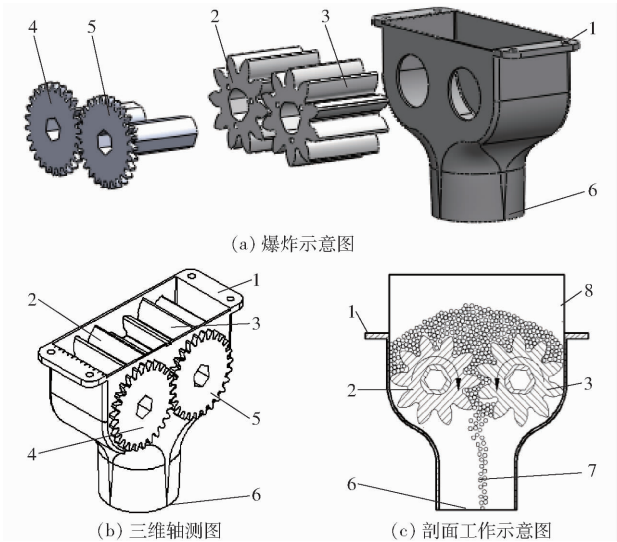


图1 双齿轮式排肥器结构示意图
Fig.1 Structure sketches of double-gear type fertilizer apparatus

1. 排肥盒 2. 左渐开线排肥齿轮 3. 右渐开线排肥齿轮 4. 左传动齿轮 5. 右传动齿轮 6. 排肥口 7. 肥料 8. 肥箱

排肥齿轮上,动力输入轴固装在左传动齿轮上。工作时,动力输入轴顺时针转动,带动左传动齿轮与右传动齿轮啮合转动,进而带动固装在其上的左右渐开线排肥齿轮转动,左右渐开线排肥齿轮是由啮合状态水平保持一段距离得到的相对位置不变的间隙排肥齿轮,排肥齿轮转动过程中带动肥箱内的肥料转动,肥料随着齿脊与齿槽间形成的容肥空间向下运动,落入排肥口,由于双齿轮的齿脊与齿槽连续交替作业,排肥齿轮的容肥空间大小基本不变,无脉动现象,肥料颗粒连续稳定地排出,提高了排肥流量的均匀性,本排肥器通过调节排肥轮的转速控制排肥量。

1.3 双渐开线排肥齿轮设计

双渐开线排肥齿轮是排肥过程中的关键部件,齿脊与齿槽间形成的容肥空间大小决定了排肥量,因此,为了得到影响排肥量的具体结构参数,需对双齿轮的容肥空间进行计算。

排肥器排出肥料的总质量为

$$m_1 = \rho V \tag{1}$$

式中 m_1 ——排出肥料质量,g

ρ ——肥料密度,g/cm³

V ——排出肥料体积, cm^3

双渐开线排肥齿轮由两个处于啮合状态的齿轮水平分开长度 c 得到的相对位置不变的非啮合齿轮, 即排肥齿轮, 啮合状态如图 2 所示, 排肥状态如图 3 所示, 阴影部分为两齿轮重合区域。图中参数分别为齿轮分度圆半径 r , 啮合状态齿轮中心距 a_1 , 左、右排肥齿轮转速 n_1 、 n_2 , 排肥齿轮齿顶圆半径 r_a , 排肥齿轮中心距 a_2 。

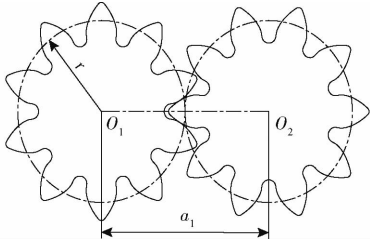


图 2 渐开线齿轮啮合状态

Fig. 2 Meshing state of involute gear

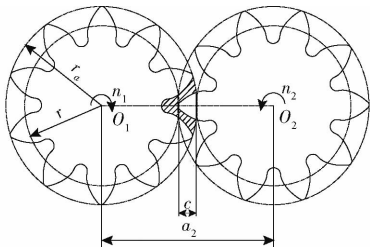


图 3 渐开线齿轮排肥状态

Fig. 3 Fertilizing state of involute gear

由齿轮啮合基本条件可知

$$a_1 = 2r \tag{2}$$
$$c = a_2 - a_1 \tag{3}$$
$$n_1 = n_2 \tag{4}$$

排肥器排出肥料总体积为

$$V = \frac{S_1 b k n t \times 10^{-4}}{6} \tag{5}$$

其中

$$k = 2z \tag{6}$$

式中 S_1 ——两渐开线齿轮容肥区的面积, mm^2

b ——排肥齿轮长度, mm

k ——排肥齿轮转动一周齿脊、齿槽重合次数

n ——排肥齿轮转速, r/min

t ——排肥器运动时间, s

z ——排肥齿轮齿数

排肥齿轮转速 n 与 n_1 、 n_2 大小相等, 当渐开线齿轮齿脊、齿槽运动到如图 3 所示状态时, 计算一次重合次数, 排肥轮转动一周重合次数为两排肥轮总齿数。

采用分度圆法^[18] 计算单个渐开线齿轮截面面积为

$$S_r = \pi r^2 \tag{7}$$

其中

$$r = \frac{zm}{2} \tag{8}$$

式中 S_r ——单个排肥齿轮齿脊截面面积, mm^2

m ——排肥齿轮模数, mm

单个渐开线齿轮齿槽的面积为

$$S_k = S_a - S_r \tag{9}$$

其中

$$S_a = \pi r_a^2 \tag{10}$$
$$r_a = \frac{(z + 2h_a^*)m}{2} \tag{11}$$

则单个齿槽的面积为

$$S_c = \frac{S_k}{z} = \frac{\pi m^2 (z + 2h_a^*)^2 - \pi (zm)^2}{4z} \tag{12}$$

式中 S_k ——单个排肥齿轮的总齿槽面积, mm^2

S_a ——单个排肥齿轮的齿顶圆面积, mm^2

S_c ——单个齿槽面积, mm^2

h_a^* ——排肥齿轮齿顶高系数

两渐开线齿轮齿脊、齿槽重合情况如图 4 所示, 其中阴影部分为两齿轮齿槽间隙即容肥区, 为方便计算将齿顶圆与轮齿的重合区域近似看作等腰梯形, 则重合区域的面积为

$$S_t = lh \tag{13}$$

其中

$$h = 2r_a - a_2 \tag{14}$$

联立式(3)、(14)可得

$$c = 2h_a^* m - h \tag{15}$$

式中 S_t ——重合区面积, mm^2

l ——等腰梯形中线长度, mm

h ——等腰梯形高度, mm

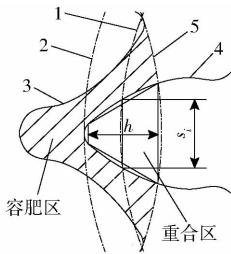


图 4 排肥齿轮容肥区示意图

Fig. 4 Area sketch of distributing fertilizer gear

1. 重合区中线所在圆 2. 右齿轮齿顶圆 3. 左齿轮齿面 4. 右齿轮齿面 5. 左齿轮齿顶圆

由图 4 可知, 重合区域梯形的中线可通过渐开线齿轮任意圆的齿厚得到, 即

$$l = S_i = \frac{sr_i}{r} - 2r_i (\text{inv} \alpha_i - \text{inv} \alpha) \tag{16}$$

其中

$$s = \frac{\pi m}{2} \tag{17}$$
$$r_i = \frac{a_2}{2} \tag{18}$$

式中 S_i ——中线所在圆齿厚, mm

s ——渐开线齿轮分度圆齿厚, mm

r_i ——中线所在圆半径, mm

α ——渐开线齿轮压力角, (°)
 α_i ——中线所在圆压力角, (°)

由渐开线齿轮极坐标方程式可知

$$\begin{cases} \text{inv}\alpha_k = \tan\alpha_k - \alpha_k \\ r_k = r_b / \cos\alpha_k \end{cases} \quad (19)$$

式中 α_k ——渐开线在任意点 K 的压力角, (°)
 r_k ——渐开线在任意点 K 的向径, mm
 r_b ——渐开线齿轮基圆直径, mm

由渐开线齿轮极坐标方程式可得

$$\cos\alpha_i = \frac{r_b}{r_i} = \frac{zm\cos\alpha}{a_2} \quad (20)$$

即
$$\alpha_i = \arccos \frac{zm\cos\alpha}{a_2} \quad (21)$$

$$\tan\alpha_i = \frac{\sqrt{a_2^2 - (zm\cos\alpha)^2}}{zm\cos\alpha} \quad (22)$$

两排肥齿轮容肥空间可表示为单个齿槽面积与等腰梯形面积的差

$$S_1 = S_c - S_i \quad (23)$$

即
$$S_1 = \frac{\pi [m^2(z + 2h_a^*) - z^2m^2]}{4z} - (2h_a^*m - c) \cdot$$

$$\left\{ \frac{\pi a}{2z} - a \left[\frac{\sqrt{a_2^2 - (zm\cos\alpha)^2}}{zm\cos\alpha} - \arccos \frac{zm\cos\alpha}{a_2} - \text{inv}\alpha \right] \right\} \quad (24)$$

由公式(24)可知两排肥齿轮容肥空间与排肥齿轮的设计参数:齿数 z 、模数 m 、压力角 α 、齿顶高系数 h_a^* 及两排肥齿轮间的中心距 a_2 、间隙 c 有关。取齿顶高系数 $h_a^* = 1$, 因 $d = mz$ 即排肥轮的齿数 z 与模数 m 的变化均会改变排肥轮的直径 d , 本次试验设定 $d = 60$ mm, 排肥轮齿数 z 参照《农业机械设计手册》^[19] 中关于外槽轮式排肥器轮齿数量的规定取 $z = 10$, 排肥轮间隙 $c = a_2 - d$, 可简化为排肥齿轮容肥空间与排肥轮压力角及间隙的关系。

以标准垄距 65 cm、作业速度上限 3 m/s 为设计依据, 由式(1)、(5)、(24) 计算可知, 当排肥轮工作转速为 60 r/min 时, 其理论排肥量可达到极限施肥量 750 kg/hm² 的农艺要求。本文首先以排肥轮压力角及排肥轮间隙为试验因素, 以改善排肥流量均匀性为优化准则, 通过仿真试验优化排肥轮结构, 设置仿真试验排肥轮转速为 60 r/min, 其次通过台架试验的方式验证通过调整排肥轮转速可控制排肥量。

2 离散元仿真平台建立

施肥作业过程中, 肥料颗粒处于流动的状态, 利用传统的试验研究方法, 无法捕捉施肥过程中肥料

颗粒所处的力学状态及空间位置分布^[20-21]。采用离散元软件 EDEM 进行仿真研究及分析, 可有效模拟排肥器的实际作业过程, 评价其作业性能, 加快排肥器的研发进度^[22-23]。LIEDEKERKE 等^[24-25] 通过离散元法分析了离心撒肥部件参数变化对肥料颗粒土壤分布状况的影响; LANDRY 等^[26] 运用离散元模型仿真分析了离心撒肥机对土壤的适应状况; 顿国强等^[27] 采用 EDEM 离散元软件, 分析了外槽轮排肥器排肥舌倒角机构参数对排肥均匀性的影响; 杨洲等^[28-29] 利用 EDEM 仿真软件和 3D 打印成型技术分析了外槽轮式排肥器结构参数和工作参数对排肥量的影响。

排肥齿轮是排肥过程中的关键部件, 其结构参数的变化直接影响排肥量及其均匀性, 因此, 采用 EDEM 建立双齿轮排肥器的仿真模型, 分析各结构参数变化对排肥量及其均匀性的影响, 得到双齿轮的最佳结构参数。

2.1 肥料颗粒离散元模型

选用江苏晋煤恒盛化工股份有限公司生产的尿素作为离散元建模的试验材料, 其粒度范围为 1.73 ~ 3.74 mm。随机选取 300 粒尿素颗粒, 测量尿素颗粒的三维尺寸(长 L 、宽 B 、高 H), 测量结果如表 1 所示。

表 1 颗粒参数
Tab.1 Particle parameters mm

参数	数值
长	2.680
宽	2.530
高	2.320
平均半径	1.255
半径标准差	0.199

计算肥料颗粒的等效直径和球度

$$D = \sqrt[3]{LBH} \quad (25)$$

$$S_p = \frac{D}{L} \times 100\% \quad (26)$$

式中 D ——肥料颗粒的等效直径, mm

S_p ——肥料颗粒的球度, %

结果分别为 2.51 mm 和 93.66%, 颗粒球度 S_p 大于 90%, 因此选用直径为 2.51 mm 的球体颗粒作为仿真的颗粒模型, 半径标准差为 0.199 mm, 服从正态分布。

2.2 仿真参数设置

肥料颗粒表面无黏附作用, 因此选择 EDEM 软件中默认的接触模型 Hertz - Mindlin (no slip)^[30], 作为肥料颗粒与肥料颗粒、肥料颗粒与排肥装置之间的接触模型, 其在力的计算方面精确且高

效^[31-32]。肥料颗粒、排肥装置的材料参数与接触参数设置如表 2 所示。

表 2 离散元仿真参数设置

Tab.2 Discrete element simulation parameter setting

参数	肥料颗粒	排肥装置
泊松比	0.25	0.43
剪切模量/Pa	1.0×10^7	1.3×10^9
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 861	1 240
静摩擦因数(与颗粒)	0.4	0.5
滚动摩擦因数(与颗粒)	0.01	0.01
碰撞恢复系数(与颗粒)	0.6	0.5

2.3 排肥器离散元模型

简化双齿轮式排肥器模型,导入 EDEM 中,按照表 2 设置参数。在肥箱上部建立颗粒工厂,生成的肥料颗粒半径呈正态分布,标准差为 0.199 mm,颗粒生成速度为 10 000 个/s,生成总量为 20 000 个,产生颗粒总时间为 2 s,设置排肥轮第 2 秒开始转动,排肥轮转速为 60 r/min,在肥料收集盒底部设置肥料质量监测区。仿真步长为 2.0×10^{-5} s,数据记录间隔为 0.005 s,仿真总时间为 10 s,仿真过程如图 5 所示。

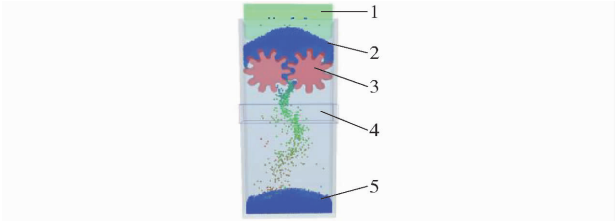


图 5 渐开线排肥齿轮 EDEM 仿真模型

Fig.5 Involute gear fertilizer wheel EDEM simulation model

1. 颗粒工厂 2. 肥料颗粒 3. 排肥齿轮 4. 肥料质量监测区
5. 肥料收集盒

2.4 排肥性能评价方法

本文主要研究排肥齿轮结构参数对排肥量均匀性的影响,为了准确评价在 EDEM 仿真试验过程中不同结构参数对排肥性能的影响,参考 JB/T 9783—2013《播种机外槽轮排肥器》可知排肥均匀度变异系数可反映排肥量的均匀性和排肥过程中的稳定性,因此以排肥均匀度变异系数作为双齿轮式排肥器排肥性能的评价指标,若变异系数过大,则排肥器的排肥稳定性和均匀性都较差,反之数值越小,排肥效果越好。

仿真结束后,统计各个时刻肥料质量监测区内肥料颗粒的总质量,计算仿真过程中肥料颗粒质量的均值

$$\bar{k} = \frac{1}{\varphi} \sum k_i$$

(27)

式中 φ ——检测的总次数

k_i ——第 i 时刻监测区内肥料颗粒的质量,g

计算仿真过程中质量监测区域内肥料颗粒质量的标准差

$$x = \sqrt{\frac{1}{\varphi - 1} \sum (k_i - \bar{k})^2}$$

(28)

得到仿真过程排肥器排肥均匀度变异系数

$$\sigma = \frac{x}{\bar{k}} \times 100\%$$

(29)

3 单因素试验与结果分析

3.1 排肥轮压力角与排肥均匀性的关系

排肥轮为渐开线齿轮,其压力角的大小会改变容肥空间的大小与形状,进而影响排肥过程中肥料下落的均布效果。依据渐开线齿轮设计原理,试验选取压力角分别为 10°、15°、20°、25°、30°、35°、40° 的 7 组排肥轮,进行排肥过程中排肥流量均匀性的对比单因素试验,其中 7 组排肥轮间隙统一取 5 mm。

不同压力角的排肥轮排肥均匀度变异系数变化趋势如图 6 所示,随着排肥轮压力角逐渐增大,排肥均匀度变异系数先减小后增大,当排肥轮压力角为 20°时,排肥均匀度变异系数最小,说明此排肥轮压力角在 20°左右时,肥料分布均匀,排肥效果较好。

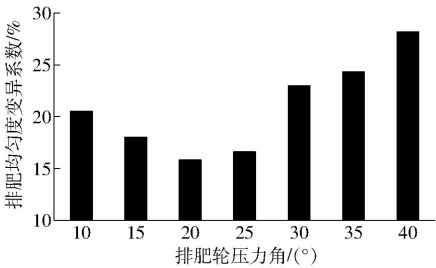


图 6 排肥轮压力角与排肥均匀度变异系数关系

Fig.6 Relationship between pressure angle of fertilizer wheel and coefficient of variation of fertilization uniformity

3.2 排肥轮间隙与排肥均匀性的关系

由理论分析可知,排肥轮间隙直接影响容肥空间的大小,进而影响排肥效果。已知试验肥料为尿素,直径为 2.51 mm,根据前期所做预试验,排肥间隙过大,则肥料直接下落,无排肥效果,排肥间隙过小则肥料堵塞排肥轮肥料无法排出,排肥间隙分别取 3、4、5、6、7 mm 的 5 组排肥轮,进行排肥过程中排肥流量均匀性的对比单因素试验,其中 5 组排肥轮压力角统一为 20°。

不同间隙的排肥轮排肥均匀度变异系数变化趋势如图 7 所示,随着排肥轮间隙逐渐增大,排肥

均匀度变异系数先减小后增大,当排肥轮间隙为 5 mm 时,排肥均匀度变异系数最小,说明此排肥轮间隙在 5 mm 左右时,肥料分布均匀,排肥效果较好。

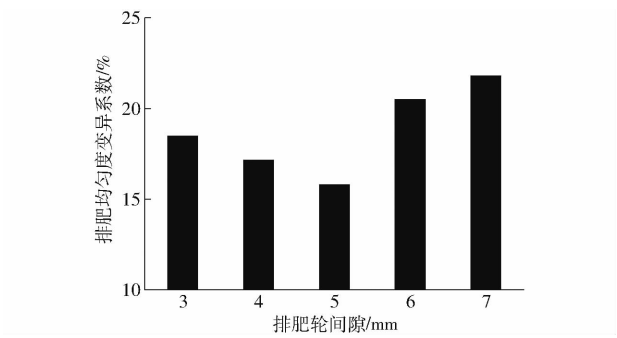


图 7 排肥轮间隙与排肥均匀度变异系数关系
Fig.7 Relationship between interval of discharge wheel and coefficient of variation of fertilization uniformity

4 响应面试验

4.1 试验设计

通过分析排肥轮不同压力角和间隙对渐开线齿轮排肥效果的影响,对排肥轮的结构参数进行优化。选用二次通用旋转组合试验方法,分析排肥轮压力角、排肥轮间隙对肥料均匀性效果的影响,以排肥均匀度变异系数作为评价指标,在单因素仿真试验结果的基础上,选取排肥轮压力角区间为 15°~25°,排肥轮间隙区间为 4~6 mm,试验因素编码如表 3 所示。

表 3 试验因素编码		
Tab.3 Coding of experimental factors		
编码	因素	
	排肥轮压力角 $x_1/(^{\circ})$	排肥轮间隙 x_2/mm
1.414	25.00	6.00
1	23.54	5.71
0	20.00	5.00
-1	16.46	4.29
-1.414	15.00	4.00

4.2 试验方案与结果分析

应用 Design-Expert 软件对试验结果进行回归分析,以确定两个试验因素下排肥均匀度变异系数的变化规律,试验方案及结果如表 4 所示。

以排肥轮压力角 x_1 、排肥轮间隙 x_2 为试验因素,以排肥均匀度变异系数 σ 为试验指标,运用 Design-Expert 软件对试验结果进行方差分析,如表 5 所示。

由表 5 可知,模型的显著性检验 $F=21.2$, $P<0.01$,决定系数 $R^2=0.9380$,表明回归模型极显著,

表 4 试验方案与结果			
Tab.4 Schemes and results of experiment			
序号	试验因素		$\sigma/\%$
	$x_1/(^{\circ})$	x_2/mm	
1	16.46	4.29	16.57
2	23.54	4.29	17.28
3	16.46	5.71	18.25
4	23.54	5.71	22.48
5	15.00	5.00	18.02
6	25.00	5.00	18.61
7	20.00	4.00	17.16
8	20.00	6.00	21.52
9	20.00	5.00	16.09
10	20.00	5.00	14.96
11	20.00	5.00	15.95
12	20.00	5.00	16.40
13	20.00	5.00	15.10

表 5 方差分析					
Tab.5 Variance analysis					
变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	58.01	5	11.60	21.20	0.0004**
x_1	4.16	1	4.16	7.60	0.0283*
x_2	21.29	1	21.29	38.89	0.0004**
x_1x_2	3.10	1	3.10	5.66	0.0490*
x_1^2	11.13	1	11.13	20.33	0.0028**
x_2^2	21.91	1	21.91	40.04	0.0004**
残差	3.83	7	0.55		
失拟差	2.23	3	0.74	1.86	0.2775
总和	61.84	12			

注:**表示差异极显著($P<0.01$),*表示差异显著($P<0.05$)。

且在试验范围拟合程度好,能够解释响应值 93.80% 的变化。由变异系数模型可知, x_1 、 x_1x_2 对方程影响显著($P<0.05$), x_2 、 x_1^2 、 x_2^2 对方程影响极显著($P<0.01$),得到变异系数的回归方程为

$$\sigma = 163.43 - 5.57x_1 - 39.91x_2 + 0.35x_1x_2 + 0.1x_1^2 + 3.52x_2^2 \quad (30)$$

4.3 试验因素对指标的影响

排肥轮压力角及排肥轮间隙对排肥均匀度影响如图 8 所示。由图 8a 可知,变异系数 σ 随排肥轮压力角、排肥轮间隙的增大均呈现先增大后减小的趋势;由图 8b 可知,排肥轮间隙对排肥均匀度变异系数的影响比排肥轮压力角大,与表 5 中的方差分析结果吻合。

4.4 参数优化及仿真验证

为了得到排肥轮的最优结构参数,对排肥轮压力角及间隙进行参数优化,设定变异系数最大为 16%,得最优参数分别为:排肥轮压力角 19.52°、排肥轮间隙 4.7 mm,此时排肥均匀度变异系数的理论

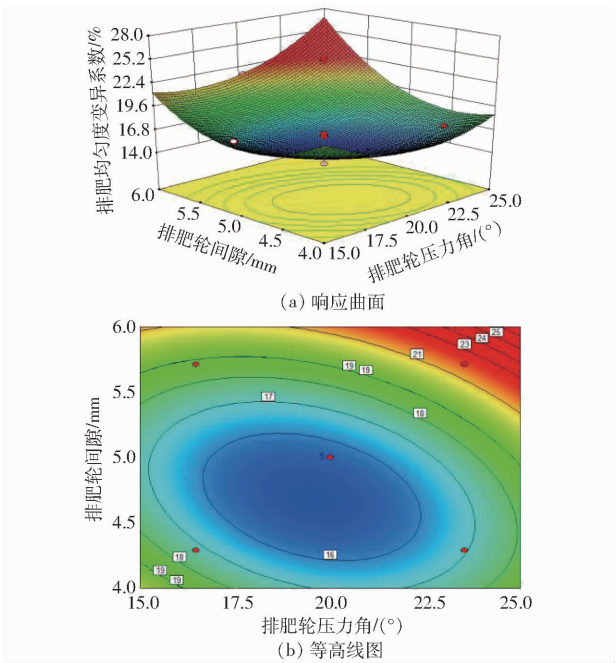


图 8 试验因素对变异系数的影响

Fig. 8 Influence of experimental factors on coefficient of variation

值为 15.30%。

为了检验参数优化的结果,在上述优化组合条件下进行仿真验证试验,仿真排肥均匀度变异系数为 14.58%,与优化理论值偏差为 0.72 个百分点,仿真验证结果与理论计算结果基本一致,证明回归模型具有准确性和可行性。

5 台架验证试验

在理论分析及仿真分析后,为验证双齿轮式排肥器优化结果的可靠性与可行性,参考 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》对双齿轮式排肥器进行试验验证。

5.1 试验材料与仪器

试验地点为东北林业大学智能农机装备实验室,时间为 2019 年 5 月。选用江苏晋煤恒盛化工股份有限公司生产的尿素作为试验材料,其粒度范围为 1.73 ~ 3.74 mm,选取最优结构参数的排肥轮,排肥轮齿数 $z = 10$,排肥轮直径 $d = 60$ mm,排肥轮槽长为 30 mm,应用 3D 打印加工排肥齿轮及排肥器的其他结构部件,如图 9 所示,试验台架为自主设计的排肥试验台,台架试验如图 10 所示。

5.2 试验方案与结果

5.2.1 性能试验

本文所设计排肥器无调肥隔板,但可通过控制转速进而控制排肥量,采用单因素试验的方法,试验因素为排肥轮转速取 20、30、40、50、60 r/min 共 5 个水平,试验指标为排肥量,每个水平试验时间为

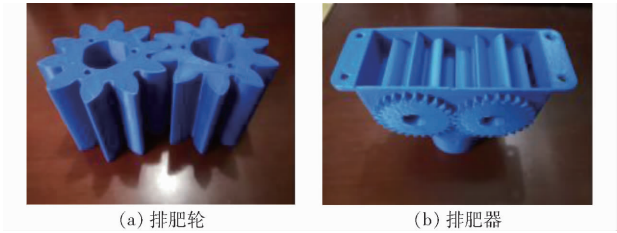


图 9 双齿轮式排肥器实物图

Fig. 9 Physical pictures of fertilizer apparatus

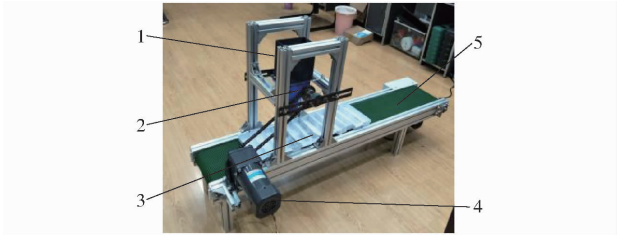


图 10 台架验证试验

Fig. 10 Bench test verification

1. 肥箱 2. 双齿轮式排肥器 3. 集肥纸盒 4. 驱动电机 5. 试验机架

10 s,试验过程中每隔 2 s 采集一次数据,每组试验重复 5 次取平均值。试验结果如表 6 所示,排肥量随工作时间的变化曲线如图 11 所示,调节排肥轮的转速可明显改变排肥量,且排肥量随工作时间呈线性变化趋势。

表 6 控制转速调节排肥量试验结果

Tab. 6 Test results of controlling speed to change quality of fertilizer

时间/ s	转速/($r \cdot min^{-1}$)				
	20	30	40	50	60
2	23.56	37.14	51.36	65.97	83.85
4	58.65	90.00	121.89	154.75	193.96
6	93.75	142.85	192.42	243.52	304.13
8	128.84	195.71	262.95	332.29	414.27
10	163.93	248.56	333.48	421.07	524.42

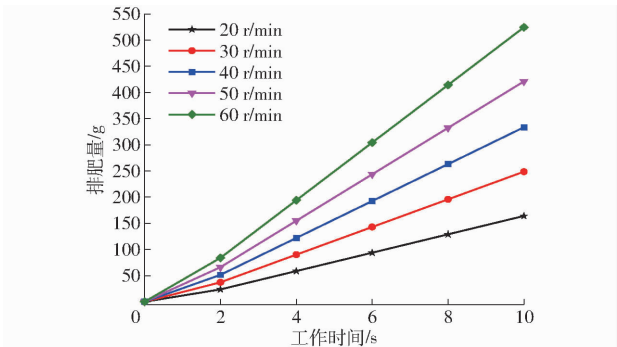


图 11 不同排肥轮转速的排肥量曲线

Fig. 11 Fertilization amount curves for different speeds of fertilization wheel

应用 Origin Pro 对试验结果进行线性拟合,拟合图如图 12 所示,排肥流量随排肥轮转速的增加而增加,拟合曲线结果显示排肥流量与排肥轮转速呈

线性相关,拟合曲线方程为: $y = 0.93x - 1.46$, $R^2 = 0.998$ 。因此,排肥器可通过改变排肥轮转速线性调节排肥流量。

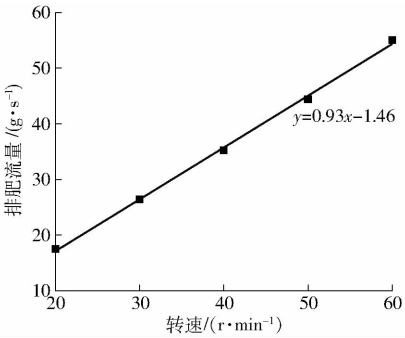


图 12 排肥轮转速与排肥流量拟合曲线

Fig. 12 Fitted curves of fertilization uniformity and speeds of fertilization wheel

5.2.2 对比验证试验

为验证排肥器施肥均匀性改善的效果及仿真优化结果的准确性,将双齿轮式排肥器和市面上应用最多的外槽轮排肥器进行施肥均匀性对比验证试验,设定两者工作转速为 60 r/min,工作槽长为 30 mm,试验时间为 10 s,每组试验重复 5 次取平均值,统计试验排肥量与试验均匀性变异系数,结果如表 7 所示。

表 7 对比验证试验结果

排肥器 型式	指标			
	排肥量/ g	排肥量	变异系数	
		相对误 差/%	数/%	相对误 差/%
双齿轮式	试验值	524.42	15.42	
	仿真值	544.30	3.79	14.58
	理论值	534.69	1.96	15.30
外槽轮式	平均值	602.54	20.29	31.58

由表 7 可知,采用优化结构参数后的排肥轮,试

验排肥量与仿真排肥量相对误差为 3.79%,与理论排肥量相对误差为 1.96%,通过分析确定主要原因为台架试验中肥料存在较大结块,未完全破碎,导致排肥量偏小,但相对误差均在 5% 以内,为可接受范围,满足实际要求。

试验变异系数与仿真值相对误差为 5.45%,与理论值相对误差为 0.78%,通过分析,确定出现偏差的原因主要为仿真时将颗粒理想为球状,而台架试验中所用的尿素颗粒并非标准球体,均匀性较差,且存在一定的结块现象,所以台架试验得到的变异系数与仿真值存在偏差,但偏差不大,两者基本吻合,说明仿真优化结果是准确的;同等条件下外槽轮排肥器变异系数的平均值为 20.29%,优化后的排肥轮变异系数与外槽轮排肥器变异系数相对误差达 31.58%,发现优化后的双齿轮式排肥器排肥效果较好,有效地提高了颗粒肥料的施肥均匀性,满足设计要求。

6 结论

(1)设计了双齿轮式排肥器,通过理论分析确定了影响其排肥均匀性的主要因素为排肥轮压力角和排肥轮间隙。

(2)单因素仿真试验结果表明,排肥轮压力角在 15°~25°,排肥轮间隙在 4~6 mm,排肥均匀性较好;由二次通用旋转组合试验得出最优结构参数组合为排肥轮压力角 19.52°、排肥轮间隙 4.7 mm,此时排肥均匀度变异系数的理论值为 15.30%。

(3)台架验证试验结果表明,可通过改变排肥轮转速实现排肥量的线性调节;试验排肥量与理论排肥量及仿真排肥量基本一致,排肥均匀度变异系数试验值为 15.42%,同等条件下外槽轮排肥器的变异系数为 20.29%,有效地提高了颗粒肥料的施肥均匀性。

参 考 文 献

[1] 唐汉,王金武,徐常塑,等. 化肥减施增效关键技术研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):1-19.
TANG Han,WANG Jinwu,XU Changsu,et al. Research progress analysis on key technology of chemical fertilizer reduction and efficiency increase[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(4):1-19. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190401&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.001. (in Chinese)

[2] 齐兴源,周志艳,杨程,等. 稻田气力式变量施肥机关键部件的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(6):20-26,316.
QI Xingyuan,ZHOU Zhiyan,YANG Cheng,et al. Design and experiment of key parts of pneumatic variable-rate fertilizer applicator for rice production[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(6):20-26,316. (in Chinese)

[3] 杨硕,王秀,翟长远,等. 支持种肥监测的变量施肥系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(10):145-153.
YANG Shuo,WANG Xiu,ZHAI Changyuan,et al. Design and test on variable rate fertilization system supporting seeding and fertilizing monitoring[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(10):145-153. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181016&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.016. (in Chinese)

- [4] 杨硕. 枸杞果园对靶排肥系统设计与试验[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
YANG Shuo. Design and experiment of wolfberry orchard target-oriented fertilizer system [D]. Yangling: Northwest A&F University,2017. (in Chinese)
- [5] 李凯,张立新,张立萍,等. 双变量施肥机的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报,2016,51(4):128-133.
LI Kai,ZHANG Lixin,ZHANG Liping,et al. Design and experiment of bivariate fertilizer[J]. Journal of Gansu Agricultural University,2016,51(4):128-133. (in Chinese)
- [6] 安晓飞,付卫强,王培,等. 小麦种行肥行精准拟合变量施肥控制系统研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(增刊):96-101.
AN Xiaofei,FU Weiqiang,WANG Pei,et al. Development of variable rate fertilization control system based on matching fertilizer line and seed line of wheat [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(Supp.):96-101. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s016&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.016. (in Chinese)
- [7] 安晓飞,王晓鸥,付卫强,等. 四要素变量施肥机肥箱施肥量控制算法设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):149-154.
AN Xiaofei,WANG Xiaou,FU Weiqiang,et al. Design and experiment of fertilizer amount control algorithm in four factors variable rate fertilization system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):149-154. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s020&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.020. (in Chinese)
- [8] 付丽娟. 基于步进电机的变量施肥装置的设计[J]. 科技创新导报,2015,12(3):109.
- [9] 张家华. 基于离散元法的变量施肥机排肥器排肥过程仿真分析[D]. 石河子:石河子大学,2015.
ZHANG Jiahua. Simulation analysis of variable fertilizer applicator apparatus fat process based on diskrete element method[D]. Shihezi:Shihezi University,2015. (in Chinese)
- [10] 梁方,杨淦光,许丰,等. 外槽轮式播种机播量控制系统设计与试验[J]. 农机化研究,2019,41(10):153-157.
LIANG Fang,YANG Ganguang,XU Feng,et al. The seeding rate control system design and experiment of the external groove wheel seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2019,41(10):153-157. (in Chinese)
- [11] 潘世强,赵亚祥,金亮,等. 2BFJ-6型变量施肥机外槽轮式排肥器的设计与试验研究[J]. 中国农机化学报,2016,37(1):40-42.
PAN Shiqiang,ZHAO Yaxiang,JIN Liang,et al. Design and experimental research of external grooved wheel fertilizer apparatus of 2BFJ-6 type variable rate fertilizer applicator[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2016,37(1):40-42. (in Chinese)
- [12] 李树伟. 水稻精量穴直播机电驱式侧深穴施肥装置设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2018.
LI Shuwei. Design and experiment of electrical drive side deep hill-drop fertilization drive for precision rice hill-direct-seeding machine[D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2018. (in Chinese)
- [13] 王金武,李树伟,张壘,等. 水稻精量穴直播机电驱式侧深穴施肥系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(8):43-54.
WANG Jinwu,LI Shuwei,ZHANG Zhao,et al. Design and experiment of electrical drive side deep hill-drop fertilization system for precision rice hill-direct-seeding machine[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(8):43-54. (in Chinese)
- [14] 顿国强,陈海涛,冯夷宁,等. 基于 EDEM 软件的肥料调配装置关键部件参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(7):36-42.
DUN Guoqiang,CHEN Haitao,FENG Yining,et al. Parameter optimization and test of key parts of fertilizer allocation device based on EDEM software[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(7):36-42. (in Chinese)
- [15] 丁筱玲,崔东云,刘童,等. 精准变量排肥器结构优化设计与试验[J]. 中国农机化学报,2019,40(1):5-12.
DING Xiaoling,CUI Dongyun,LIU Tong,et al. Optimization design and experiment of precision variable fertilizer device [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2019,40(1):5-12. (in Chinese)
- [16] 祝清震,武广伟,罗长海,等. 基于姿态实时监测的多路精准排肥播种控制系统研究[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):155-163.
ZHU Qingzhen,WU Guangwei,LUO Changhai,et al. Design of multipath precision fertilizer and sowing control system based on attitude real time monitoring[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):155-163. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018S021&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.021. (in Chinese)
- [17] 祝清震,武广伟,陈立平,等. 槽轮结构参数对直槽轮式排肥器排肥性能的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(18):12-20.
ZHU Qingzhen,WU Guangwei,CHEN Liping,et al. Influences of structure parameters of straight flute wheel on fertilizing performance of fertilizer apparatus[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(18):12-20. (in Chinese)
- [18] 李华敏. 渐开线齿轮的几何原理与计算[M]. 北京:机械工业出版社,1985:2-4.
- [19] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,1974.
- [20] 薛忠,赵亮,王凤花,等. 基于 EDEM 的螺旋式排肥器排肥性能研究[J]. 农机化研究,2020,42(6):87-95.
XUE Zhong,ZHAO Liang,WANG Fenghua,et al. Study on the performance of spiral fertilizer distributor based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2020,42(6):87-95. (in Chinese)

- [21] 吴雪梅,王芳,张富贵,等. 基于 EDEM 的深施肥器排肥与阻力影响因素分析[J]. 农机化研究,2020,42(3):175-181.
WU Xuemei,WANG Fang,ZHANG Fugui,et al. Analyzing on factors influencing fertilizer discharge and resistance of deep fertilizing device based on EDEM software[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2020,42(3):175-181. (in Chinese)
- [22] 王云霞,梁志杰,张东兴,等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报,2016,32(22):36-42.
WANG Yunxia,LIANG Zhijie,ZHANG Dongxing,et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(22):36-42. (in Chinese)
- [23] 贺一鸣,吴明亮,向伟,等. 离散元法在农业工程领域的应用进展[J]. 中国农学通报,2017,33(20):133-137.
HE Yiming,WU Mingliang,XIANG Wei,et al. Application progress of discrete element method in agricultural engineering[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2017,33(20):133-137. (in Chinese)
- [24] LIEDEKERKE P V,TIJSKENS E, RAMON H. Discrete element simulations of the influence of fertilizer physical properties on the spread pattern from spinning disc spreaders[J]. Biosystems Engineering,2009,102:392-405.
- [25] LIEDEKERKE P V,TIJSKENS E,DINTWA E,et al. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader [J]. Powder Technology,2009,190:348-360.
- [26] LANDRY H,THIRION F,LAGUE C,et al. Numerical modeling of the flow of organic fertilizers in land application equipment [J]. Computers and Electronics in Agriculture,2006,51:35-53.
- [27] 顿国强,于春玲,杨永振,等. 外槽轮排肥器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. Discharging characteristic test of outer-groove wheel fertilizer and parameter optimization of fertilizer tongue by discrete element simulation[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences),2018,44(6):661-665. (in Chinese)
- [28] 杨洲,朱卿创,孙健峰,等. 基于 EDEM 和 3D 打印成型的外槽轮排肥器排肥性能研究[J]. 农机化研究,2018,40(5):175-180.
YANG Zhou,ZHU Qingchuang,SUN Jianfeng,et al. Study on the performance of fluted roller fertilizer distributor based on EDEM and 3D printing [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2018,40(5):175-180. (in Chinese)
- [29] 杨洲,张卓伟,李君,等. 蕉园自走式压穴施肥机设计与试验[J]. 农机化研究,2019,41(7):171-177.
YANG Zhou,ZHANG Zhuowei,LI Jun,et al. Design and experiment of self-propelled punching fertilizer applicator for banana plantation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2019,41(7):171-177. (in Chinese)
- [30] MARIGO M,STITT E H. Discrete element method (DEM) for industrial applications; comments on calibration and validation for the modelling of cylindrical pellets[J]. KONA Powder and Particle Journal,2015,32:236-252.
- [31] 祝清震,武广伟,陈立平,等. 小麦宽苗带撒播器弹籽板结构设计及优化[J]. 农业工程学报,2019,35(1):1-11.
ZHU Qingzhen,WU Guangwei,CHEN Liping,et al. Structural design and optimization of seed separated plate of wheat wide-boundary sowing device [J]. Transactions of the CSAE,2019,35(1):1-11. (in Chinese)
- [32] 张锐,韩佃雷,吉巧丽,等. 离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(3):49-56.
ZHANG Rui,HAN Dianlei,JI Qiaoli,et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(3):49-56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170306&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.006. (in Chinese)