

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.10.012

弧槽双螺旋式排肥器优化设计与试验

顿国强¹ 刘文辉¹ 杜佳兴² 周成³ 毛宁¹ 纪文义⁴
(1. 东北林业大学机电工程学院, 哈尔滨 150040; 2. 佳木斯大学机械工程学院, 佳木斯 154007;
3. 湖州师范学院信息工程学院, 湖州 313000; 4. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要:为实现排肥器的精量排肥,对采用错位叠加单螺旋排肥曲线原理的弧槽双螺旋式排肥器的排肥性能进行理论分析,确定其排肥量及影响其排肥性能的因素,以螺距 S 、弧槽半径 R_p 、中心距 a 为试验因素,并以均匀性变异系数、施肥精度为试验指标,进行了三因素三水平 Box-Behnken 试验,得到最优参数:螺距 S 为 35 mm,弧槽半径 R_p 为 17.5 mm,中心距 a 为 35 mm,在最优参数组合下制作排肥器并进行台架验证试验与对比试验,试验结果表明:台架试验的均匀性变异系数、施肥精度与仿真试验相对误差分别为 5.07%、4.69%,仿真与台架试验吻合度较好,对比试验结果表明:优化后弧槽双螺旋式排肥器施肥精度为 3.35%,施肥精度较高,优化后弧槽双螺旋式排肥器较未优化弧槽双螺旋式排肥器、单螺旋排肥器均匀性变异系数分别降低 7.26、15.48 个百分点,优化后的弧槽双螺旋式排肥器排肥性能良好。

关键词:单螺旋排肥器;弧槽双螺旋式排肥器;均匀性;结构优化;离散元

中图分类号: S147.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)10-0118-08 OSID: 

Optimal Design and Experiment of Arc-groove Double-spiral Fertilizer Discharge Device

DUN Guoqiang¹ LIU Wenhui¹ DU Jiaying² ZHOU Cheng³ MAO Ning¹ JI Wenyi⁴
(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China
2. School of Mechanical Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China
3. School of Information Engineering, Huzhou University, Huzhou 313000, China
4. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Precision fertilization is a high-efficiency fertilization method, and the fertilizer ejector is a key link in precision fertilization. In order to realize the precise fertilizer discharge of the fertilizer ejector, the fertilizer discharge performance of the arc-groove double-screw fertilizer discharge device based on the principle of dislocation superposition single screw fertilizer discharge curve was analyzed, the factors affecting its fertilizer discharge performance were obtained, and the factors affecting the fertilizer discharge uniformity of the arc-groove double-spiral fertilizer discharge device were obtained, taking the pitch S , arc-groove radius R_p and center distance a as the test factors, and taking the uniformity variation coefficient and fertilization accuracy as the test indexes, the three-factor and three-level Box-Behnken test was carried out. The optimal parameters were pitch $S = 35$ mm, arc-groove radius $R_p = 17.5$ mm and center distance $a = 35$ mm. The arc-groove double-spiral fertilizer discharge device was made under the optimal parameter combination, and the bench verification test and comparative test were carried out. The test results showed that the uniformity variation coefficient of bench test and the relative error between fertilization accuracy and simulation test were 5.07% and 4.69%, respectively, and there was little difference between them, which verified the correctness of simulation. The uniformity variation coefficient of the optimized arc-groove double-spiral fertilizer discharge device was 7.26 and 15.48 percentage points lower than that of the non optimized arc-groove double-spiral fertilizer discharge device and single spiral

收稿日期: 2021-11-26 修回日期: 2022-01-10
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(2572020BF03)、黑龙江省教育厅基本科研业务费基础研究项目(2020-KYYWF-0257)和东北林业大学横向课题项目(43220017)
作者简介:顿国强(1986—),男,讲师,博士,主要从事农业及林业机械装备研究,E-mail: dunguoqiangpaper@163.com
通信作者:周成(1973—),男,研究员,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: 03054@zjhu.edu.cn

fertilizer discharge device respectively. The optimized arc-groove double-spiral fertilizer discharge device had good fertilizer uniformity and effectively solved the problem of uneven fertilizer discharge of the single helix fertilizer ejector, it can provide a reference for the structural improvement and optimization of arc-groove double spiral fertilizer ejector.

Key words: single screw fertilizer discharger; arc-groove double-spiral fertilizer discharge device; uniformity; structural optimization; discrete element

0 引言

精量施肥是一种按照农作物养分的供需关系精准高效施肥的方法,对提高肥料利用率、减少化肥施用量具有重要意义^[1],可使农业资源得到最优配置,促进农业可持续发展,由于排肥器是精量施肥中的关键一环,因此提高排肥器的排肥性能对实现精量排肥具有重要意义^[2-3]。

目前,商品化的排肥器主要分为螺旋排肥器与外槽轮排肥器,螺旋排肥器作为常用排肥器具有结构简单、输送量可调、价格低廉等优点^[4-6],近年来相关学者对提高传统单螺旋排肥器的排肥精度与均匀性进行了大量研究,KRETZ 等^[7]进行了螺旋设计参数及安装倾角等对螺旋出口物料流率稳定性影响的仿真及台架试验,使出口处的流率更均匀;DEBAYAN 等^[8]利用短距螺旋对不同螺旋转速下的填充率进行了试验研究;ANTON 等^[9]利用电容传感器对螺旋排肥器排量进行监测;薛忠等^[10]对排肥器的排肥稳定性与均匀性进行了仿真及台架实验,优化得到排肥器排肥均匀与稳定的最佳转速,对于通过改变转速调节排肥量的场景并不适用;随着计算机技术的发展,离散元法及其数值模拟仿真软件 EDEM 在农业工程领域中得到了广泛应用^[11-13],宋欢^[14]基于 EDEM 仿真法在入肥口处采用双线螺旋结构对螺旋输送机构进行优化,使物料排出的脉动峰值降低,但脉动幅度与平均值之间的比值依然较大,不能满足均匀排肥的需求。上述研究主要针对单螺旋精量排肥等方面,由于单螺旋自身结构缺陷导致其不可避免出现排肥脉动的问题^[15],基本难以实现均匀精量排肥,因此,本研究通过单螺旋排肥器瞬时排肥特性分析确定排肥脉动原理的基础上,采用错位叠加单螺旋排肥曲线原理设计弧槽双螺旋式排肥器,并对其排肥性能进行研究。

本文依据单螺旋排肥器排肥曲线设计弧槽双螺旋式排肥器,借助离散元仿真软件 EDEM 对排肥器的排肥过程进行仿真分析,采用三因素三水平的 Box - Behnken 试验方法优化中心距、螺距和弧槽半径,并利用 3D 打印技术加工优化后的排肥器,进行台架试验验证仿真结果的正确性。

1 整机结构与工作原理

弧槽双螺旋式排肥器结构如图 1 所示,由齿轮、左旋排肥螺旋、右旋排肥螺旋、壳体、端盖组成,通过一对相互啮合的齿轮对中旋转,带动左、右旋排肥螺旋对中旋转,肥料在重力作用下由肥箱通过入肥口落在左、右旋排肥螺旋的上部,在左、右旋排肥螺旋的搅混作用下在中上部对中混合,同时旋转的排肥螺旋推动肥料轴向移动到排肥口,排肥口处左、右旋排肥螺旋交替排肥可对单排肥螺旋的周期性排肥波动进行补偿,提高了弧槽双螺旋式排肥器的排肥均匀性,肥料依靠重力落入排肥管中,完成排肥过程。

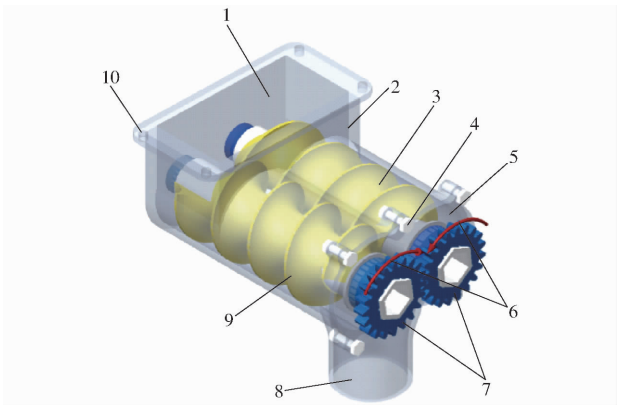


图 1 双螺旋排肥器结构示意图

Fig. 1 Schematic of structure of arc-groove double-spiral fertilizer discharge device

1. 入肥口 2. 壳体 3. 左旋弧槽排肥螺旋 4. 螺栓 5. 端盖
6. 排肥螺旋旋向 7. 齿轮 8. 排肥口 9. 右旋弧槽排肥螺旋
10. 安装孔

2 排肥性能分析

2.1 单螺旋排肥器排肥特性分析

为了探究单螺旋排肥器的瞬时排肥特性,参照 GB/T 35487—2017 规定的最大排肥量 375 kg/hm^2 ,依据文献^[16]确定排肥螺旋参数:螺旋叶片大径 $R = 25\text{ mm}$;螺旋叶片小径 $r = 7.5\text{ mm}$;螺距 $S = 35\text{ mm}$;螺旋叶片厚度 $b = 2\text{ mm}$,试验肥料颗粒采用史丹利复合肥(平均半径 1.64 mm 、密度 1.86 g/cm^3),通过台架试验对单螺旋排肥器排肥特性进行研究,如图 2 所示。

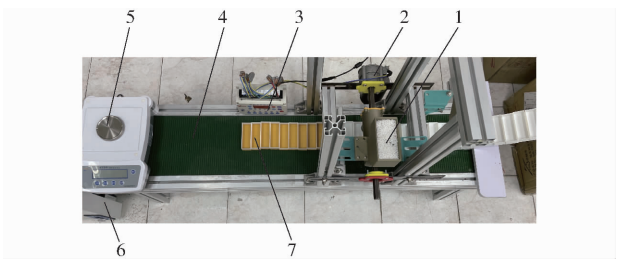


图2 单螺旋排肥器试验装置

Fig.2 Single screw fertilizer metering device

1.单螺旋排肥器 2.驱动电机 3.电机控制器 4.传送带 5.精密电子秤 6.传送带控制器 7.集肥盒

排肥器转速应小于临界转速,根据

$$n_{\max} = \frac{A}{\sqrt{2R}} \tag{1}$$

式中 $n_{\max}$ ——排肥器临界转速,r/min

A ——物料综合系数,取25^[17]

可知螺旋排肥器临界转速为111.8 r/min,当转速低于一定值时,肥料间相对滑动少,易出现堵塞现象,当螺旋转速大于临界转速时,排肥螺旋叶片主要为搅拌肥料,对肥料颗粒轴向推进作用较小,同时为方便数据测量,综合考量下取排肥器转速60 r/min、传送带移动速度0.2 m/s进行试验,取3 s后的排肥稳定段利用集肥盒进行测量,每个集肥盒宽20 mm,将传送带上每20 mm长设置集肥盒,利用精密电子秤对集肥盒内的肥料质量进行测量。

统计试验数据得出单螺旋排肥器排肥特性曲线,如图3所示,通过分析单螺旋排肥器的排肥特性曲线可知:单螺旋排肥器的排肥曲线呈周期性变化,将排肥曲线理想化为正弦函数,根据正弦函数性质可知,增加排肥轮数量与调整安装角度可以实现均匀排肥的目的。

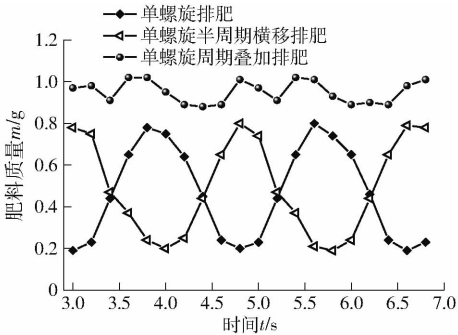


图3 周期排肥特性曲线

Fig.3 Periodic fertilizer discharge characteristic curve

由于每增加一条排肥曲线,对应的传动齿轮、排肥轮、腔体都成套增加,使系统的可靠性降低,同时制造成本增加,因此在综合考量下,采用双排肥曲线叠加制造排肥器。但单螺旋排肥曲线并非严格的正弦曲线,因此需要对双螺旋排肥器进行结构优化,进

一步提高其排肥均匀性。

2.2 弧槽双螺旋式排肥器理论排肥量

弧槽双螺旋式排肥器理论排肥量主要由单个转动周期内内腔体积与排肥轮体积之差所决定,双螺旋内腔截面如图4所示,其表面积计算式为

$$S_{\text{shell}} = 2\pi R^2 \left(1 - \frac{\alpha}{360}\right) + \frac{R}{2} \sqrt{R^2 - \frac{a^2}{4}} - 2\pi r^2 \tag{2}$$

其中

$$\alpha = \arccos \frac{a}{2R}$$

式中 S_{shell} ——壳体周向截面积,mm²

α ——1/2 重合区夹角,(°)

a ——中心距,mm

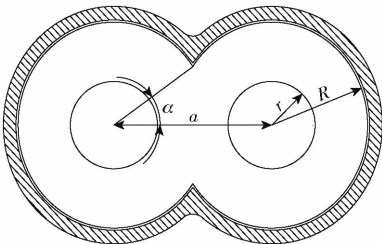


图4 弧槽双螺旋式排肥器壳体截面图

Fig.4 Sectional view of arc-groove double-spiral fertilizer discharge device shell

将沿螺旋线旋转的螺旋叶片按照图5所示展开,螺旋叶片下料圆坯尺寸参数计算式为

$$\begin{cases} L = \sqrt{(2\pi R)^2 + S^2} \\ l = \sqrt{(2\pi r)^2 + S^2} \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} R_1 = \frac{(R-r)L}{L-l} \\ r_1 = \frac{(R-r)l}{L-l} \end{cases} \tag{4}$$

$$\beta = \frac{360(2\pi R_1 - L)}{2\pi R_1} \tag{5}$$

式中 L ——圆坯大径弧长,mm

l ——圆坯小径弧长,mm

R_1 ——螺旋叶片下料外径,mm

r_1 ——螺旋叶片下料内径,mm

β ——圆坯展开缺角,(°)

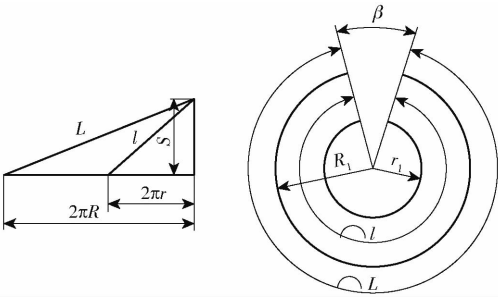


图5 螺旋叶片展开图

Fig.5 Expanded view of spiral blade

排肥轮螺旋叶片截面如图 6 所示,其体积可以分为黑色区域旋转一周体积 V_1 与阴影区域旋转一周体积 V_2 。计算式为

$$V_1 = 2 \int_{-\frac{S-b}{2}}^{\frac{S-b}{2}} [r_1 + R_p + \sqrt{R_p^2 - (x - R_p)^2}]^2 dx \quad (6)$$

解得

$$V_1 = \frac{8\pi(r_1 + R_p)}{3} \left[\frac{(S-b)^2}{4} - R_p(S-b) \right]^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

$$V_2 = \pi(R_1^2 - r_1^2)b \quad (8)$$

$$V_{\text{blade}} = (V_1 + V_2) \left(1 - \frac{\beta}{360} \right) \quad (9)$$

式中 V_{blade} ——螺旋叶片旋转一周体积, mm^3
 x —— xy 坐标系下弧槽曲线横坐标, mm
 R_p ——弧槽半径, mm
 b ——螺旋叶片厚度, mm

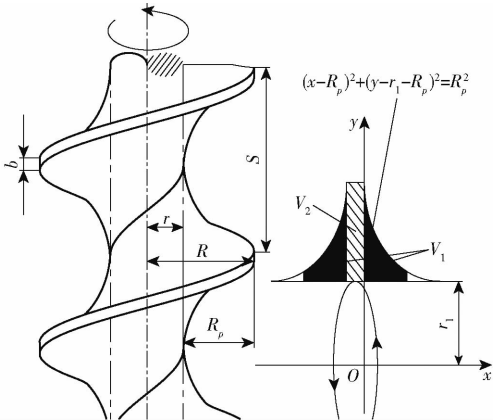


图 6 螺旋叶片截面图

Fig. 6 Cross section of helical blade

为防止凹槽圆弧出现空隙,导致肥料颗粒残留,同时弧槽半径还需满足结构设计限制,如图 6 所示,因此,螺距 S 、螺旋叶片厚度 b 、弧槽半径 R_p 三者之间满足

$$S \leq 2R_p + b \quad (10)$$

螺旋叶片大径 R 、小径 r 与弧槽半径 R_p 三者之间满足

$$R_p \leq R - r \quad (11)$$

弧槽双螺旋式排肥器理论排肥流量为

$$Q = (SS_{\text{shell}} - V_{\text{blade}})nt\varphi\rho \quad (12)$$

式中 Q ——排肥流量, g/s

t ——排肥时间, s

n ——排肥器转速, r/min

ρ ——肥料堆积密度, g/cm^3

φ ——肥料填充系数,取 $0.7^{[18]}$

2.3 弧槽双螺旋式排肥器均匀性分析

由于肥料颗粒在排肥器中并非满充填状态^[19],因此螺旋叶片处在不同位置时有效排肥体积 ΔV 会

产生波动,有效排肥体积 ΔV 的变化幅度决定了排肥是否均匀。

当螺旋叶片大径 R 、小径 r 、螺旋叶片厚度 b 、排肥器转速 n 为定值时,通过增大排肥器周向截面积 S_{axial} 与减小螺旋叶片轴向横截面积 S_{wheel} 实现降低有效排肥体积 ΔV 的波动,排肥器周向截面积 S_{axial} 仅与中心距 a 、螺距 S 、弧槽半径 R_p 有关(图 7)。

$$S_{\text{axial}} = \frac{SS_{\text{shell}} - V_{\text{blade}}}{S} \quad (13)$$

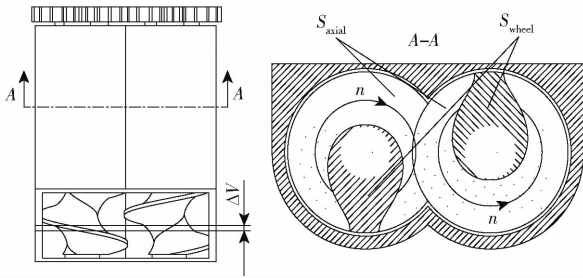


图 7 排肥器周向截面图

Fig. 7 Circumferential section of fertilizer ejector

中心距 a 应保证螺旋叶片相互重合,且不相互碰撞,即中心距 a 满足

$$R + \frac{r}{2} \leq a \leq 2R \quad (14)$$

计算得 $30 \text{ mm} \leq a \leq 45 \text{ mm}$ 。

查阅文献[6, 20]可知螺距 S 优化区间介于 $(1 \sim 1.4)R$ 之间,螺距 S 过小则需提高排肥器转速 n 增加排肥量,排肥器转速 n 增加则会加剧排肥器磨损,降低排肥器使用寿命,因此螺距 S 不宜过小,综合考虑取 $30 \text{ mm} \leq S \leq 35 \text{ mm}$ 。

由式(10)、(11)得:弧槽半径 $16.5 \text{ mm} \leq R_p \leq 17.5 \text{ mm}$,因此,设定弧槽半径 R_p 的试验优化区间为 $16.5 \text{ mm} \leq R_p \leq 17.5 \text{ mm}$ 。

3 弧槽双螺旋式排肥器排肥性能仿真优化

3.1 仿真参数设定

为确定弧槽双螺旋式排肥器的最佳结构参数,通过仿真试验进行弧槽双螺旋式排肥器的参数优化,仿真试验肥料采用纯球体建模,肥料平均半径 1.64 mm 、密度 1.86 g/cm^3 ,排肥器采用 PLA 塑料 3D 打印,查阅文献[20 ~ 22]确定接触力学参数如表 1 所示。

3.2 仿真试验

利用 SolidWorks 对不同参数的排肥器进行建模,并对不必要的结构进行简化处理,简化后排肥器主要由外壳、肥箱、双排肥轮、颗粒工厂、集肥槽 5 部分构成,将模型转换成 stl 文件导入 EDEM 中,因排肥器每一个排肥循环周期,肥料具有相同的运动规

表 1 全局变量参数设置

Tab.1 Global variable parameters setting		
项目	参数	数值
肥料颗粒	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	1.0×10^7
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 861
排肥轮、壳体	泊松比	0.394
	剪切模量/Pa	3.18×10^8
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 240
颗粒-颗粒	恢复系数	0.11
	静摩擦因数	0.30
	滚动摩擦因数	0.10
颗粒-排肥轮、壳体	恢复系数	0.41
	静摩擦因数	0.32
	滚动摩擦因数	0.18

律,为便于参数设置及仿真监测区数据的提取,并与上文的单螺旋排肥器对比分析,设置排肥轮转速 60 r/min,排肥器移动速度 0.2 m/s,仿真步长 9.25×10^{-6} s,数据记录间隔 0.01 s,弧槽双螺旋式排肥器 EDEM 仿真模型如图 8 所示。

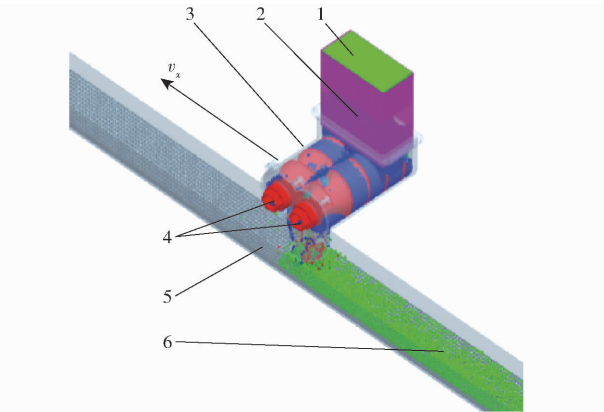


图 8 EDEM 仿真图

Fig.8 EDEM simulation

1. 颗粒工厂 2. 肥箱 3. 壳体 4. 弧槽式排肥轮 5. 集肥槽
6. 肥料颗粒

3.3 试验因素

由于中心距、弧槽半径、螺距是影响排肥器工作性能的重要参数,对排肥器排肥均匀性起着决定性作用,故试验选取中心距、弧槽半径和螺距为试验因素,采用三因素三水平 Box – Behnken 试验方法,试验因素编码如表 2 所示。应用 Design-Expert 8.0.6 软件进行数据处理和统计分析。

表 2 试验因素编码

Tab.2 Test factors and coding				mm
编码	因素			
	螺距 S	中心距 a	弧槽半径 R_p	
1	35.00	45.00	17.50	
0	32.50	40.00	17.00	
-1	30.00	35.00	16.50	

3.4 试验指标

采用网格法^[23]对排肥均匀性进行数据统计,如图 9 所示,网格单元间肥料均匀性变异系数越小,排肥的均匀性越好,根据单圈排肥时间与网格总长度,计算出排肥器前进速度,将网格划分为 10 份,统计各网格内的肥料质量,改变网格位置,测量同一转速不同排肥时间的肥料颗粒总质量,重复 3 次,计算得出均匀性变异系数。

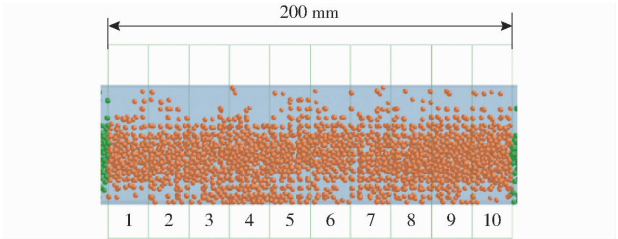


图 9 网格划分示意图

Fig.9 Schematic of grid division

施肥精度表示理论施肥量与实际施肥量之间的差异,施肥精度越高代表排肥器排肥量偏差越小^[24],测量单个排肥周期内的排肥质量与理论值进行比较,重复 3 次,计算得到施肥精度。

3.5 试验结果与分析

试验方案与结果如表 3 所示,表中 x_1 、 x_2 和 x_3 表示因素编码值。

表 3 试验方案与结果

Tab.3 Test scheme and results					
序号	因素			均匀性变异	施肥精度
	x_1	x_2	x_3	系数 $y_1/\%$	$y_2/\%$
1	-1	-1	0	13.96	2.60
2	1	-1	0	7.00	2.26
3	-1	1	0	16.42	2.78
4	1	1	0	10.19	1.56
5	-1	0	-1	11.23	0.92
6	1	0	-1	7.52	0.42
7	-1	0	1	12.32	3.56
8	1	0	1	9.35	2.64
9	0	-1	-1	8.25	0.56
10	0	1	-1	12.22	1.24
11	0	-1	1	14.22	4.92
12	0	1	1	14.24	2.24
13	0	0	0	27.96	6.64
14	0	0	0	30.46	6.72
15	0	0	0	29.06	6.96
16	0	0	0	28.46	6.58
17	0	0	0	27.46	6.96

3.6 试验因素对试验指标的影响

均匀性变异系数方差分析如表 4 所示。模型的显著性检验中 $F = 62.51$, $P < 0.01$,回归模型极显著,失拟项检验结果为不显著($P > 0.05$),表明回归

模型在试验范围拟合程度较好。

表 4 方差分析						
Tab. 4 Analysis of variance of uniformity coefficient of variation						
评价指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
均匀性变 异系数	模型	1 143. 12	9	127. 01	62. 51	<0. 000 1
	x_1	49. 35	1	49. 35	24. 29	0. 001 7
	x_2	11. 62	1	11. 62	5. 72	0. 048 1
	x_3	14. 88	1	14. 88	7. 32	0. 030 4
	$x_1 x_2$	0. 13	1	0. 13	0. 066	0. 805 3
	$x_1 x_3$	0. 14	1	0. 14	0. 067	0. 802 7
	$x_2 x_3$	3. 90	1	3. 90	1. 92	0. 208 4
	x_1^2	376. 61	1	376. 61	185. 35	<0. 000 1
	x_2^2	226. 23	1	226. 23	111. 34	<0. 000 1
	x_3^2	350. 02	1	350. 02	172. 26	<0. 000 1
施肥精度	残差	18. 39	10	1. 84		
	失拟项	13. 03	6	2. 17	1. 62	0. 333 9
	纯误差	5. 37	4	1. 34		
	总变异	1 157. 35	16			
	模型	94. 09	9	10. 45	168. 17	<0. 000 1
	x_1	1. 11	1	1. 11	17. 86	0. 003 9
	x_2	0. 79	1	0. 79	12. 77	0. 009 1
	x_3	13. 06	1	13. 06	210. 01	<0. 000 1
	$x_1 x_2$	0. 19	1	0. 19	3. 11	0. 121 0
	$x_1 x_3$	0. 044	1	0. 044	0. 71	0. 427 5
	$x_2 x_3$	2. 82	1	2. 82	45. 40	0. 000 3
	x_1^2	24. 53	1	24. 53	394. 51	<0. 000 1
	x_2^2	17. 84	1	17. 84	286. 99	<0. 000 1
	x_3^2	25. 76	1	25. 76	414. 37	<0. 000 1
	残差	0. 44	7	0. 062		
	失拟项	0. 31	3	0. 10	3. 21	0. 144 6
	纯误差	0. 13	4	0. 032		
	总变异	94. 53	16			

x_1 、 x_1^2 、 x_2^2 、 x_3^2 对均匀性变异系数影响极显著 ($P < 0.01$), x_2 、 x_3 影响显著 ($0.01 < P < 0.05$), 其余项无影响 ($P > 0.05$), 剔除回归方程中系数影响不显著因素, 各因素与均匀性变异系数的回归方程为

$$y_1 = 28.68 - 2.48x_1 + 1.21x_2 + 1.36x_3 - 9.46x_1^2 - 7.33x_2^2 - 9.12x_3^2 \quad (15)$$

施肥精度模型的方差分析如表 4 所示。模型的显著性检验中 $F = 168.17$, $P < 0.01$, 回归模型极显著, 失拟项检验结果为不显著 ($P > 0.05$), 表明回归模型在试验范围拟合程度较好。

x_1 、 x_2 、 x_3 、 $x_2 x_3$ 、 x_1^2 、 x_2^2 、 x_3^2 影响极显著 ($P < 0.01$), 其余项无影响 ($P > 0.05$)。各因素与施肥精度的回归方程为

$$y_2 = 6.77 - 0.37x_1 - 0.32x_2 + 1.28x_3 - 0.84x_2x_3 - 2.41x_1^2 - 2.06x_2^2 - 2.47x_3^2 \quad (16)$$

通过分析中心距与弧槽半径对施肥精度影响的

响应曲面(图 10)可知,当中心距 a 为低水平时,施肥精度 y_2 随着弧槽半径 R_p 的增大先增大后微降,当中心距 a 为高水平时,施肥精度 y_2 随着弧槽半径 R_p 的增大先增大后下降;当弧槽半径为高水平时,施肥精度 y_2 随着中心距 a 增大先增大后略降,当弧槽半径为低水平时,施肥精度 y_2 随着中心距 a 增大先增大后降低。

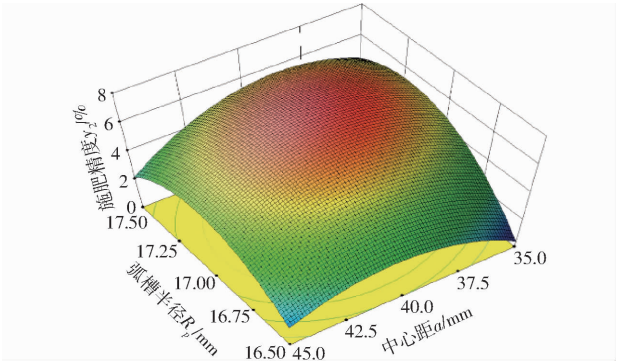


图 10 弧槽半径、中心距对施肥精度影响的响应曲面
Fig. 10 Response surface of arc-groove radius and center distance to fertilization accuracy

中心距大时,排肥器相当于两个独立的排肥系统,因此螺旋叶片对肥料搅混作用小,施肥精度高,当中心距小时,交叠的螺旋叶片等价于螺距缩小一半的螺旋叶片,因此施肥精度高。

3.7 参数优化

中心距越小,排肥器制造成本越低,因此将中心距设定为 35 mm,为了获得中心距最小时的排肥器最佳参数组合,利用 Design-Expert 8.0.6 多目标优化方法,得到优化方程

$$\begin{cases} y = f(x_1, x_2, x_3) \\ y_1 \leq 10\% \\ y_2 \leq 5\% \\ \text{s. t. } \begin{cases} -1 \leq x_1 \leq 1 \\ x_2 = -1 \\ -1 \leq x_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

基于上述优化方程,得到优化区间如图 11 所示。螺距越大、弧槽半径越大,排肥轮体积越小,制

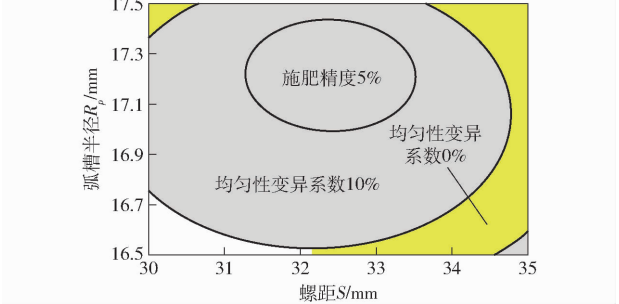


图 11 参数优化分析

Fig. 11 Parameters optimization analysis

造成本越小,因此选用参数组合为:中心距 a 为 35 mm、螺距 S 为 35 mm、弧槽半径 R_p 为 17.5 mm。

4 台架试验

4.1 试验设计

试验于 2021 年 7 月在黑龙江省东北林业大学银行学校 200 试验中心进行。本试验采用史丹利复合肥(平均半径 1.64 mm、密度 1.86 g/cm³),采用中心距 a 为 35 mm、螺距 S 为 35 mm、弧槽半径 R_p 为 17.5 mm 的排肥器进行验证试验,排肥器按照 60 r/min 进行试验,待排肥稳定后,启动电机控制传送带按照速度 0.2 m/s 移动,集肥盒长度为 20 mm,排肥器单个排肥周期采集 10 份,利用精密电子秤对肥料进行称量,更换未优化弧槽双螺旋排肥器(排肥轮参数与单螺旋排肥轮相同)进行对比试验,均匀性变异系数与施肥精度采用与仿真试验相同的方法进行数据统计,台架试验中单个网格用宽 20 mm 的集肥盒替代,每组试验重复 5 次取平均值,台架验证与对比试验装置如图 12 所示。

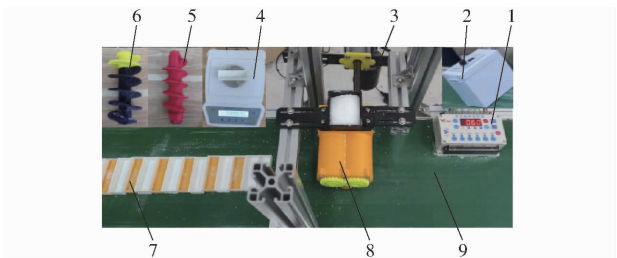


图 12 台架验证与对比试验装置

Fig. 12 Bench verification and comparison test device

1. 电机控制器 2. 传送带控制器 3. 驱动电机 4. 精密电子秤
5. 优化后弧槽排肥轮 6. 未优化弧槽排肥轮 7. 集肥盒 8. 排肥器 9. 传送带

4.2 试验结果

根据台架验证与对比试验结果(表 5)计算可知:仿真试验与台架试验的均匀性变异系数、施肥精度相对误差分别为 5.07%、4.69%,说明仿真优化结果是正确的,造成误差的主要原因是仿真试验中采用球体肥料颗粒,但台架试验中的复合肥球度小于 100%,且肥料中偶有结块肥,因此台架试验数据与仿真试验数据有差异。

表 5 台架验证与对比试验结果

Tab. 5 Bench verification and comparison test results

排肥器类型	试验类型	均匀性变异系数/%	施肥精度/%
优化后弧槽双螺旋式排肥器	仿真试验	7.50	3.20
螺旋式排肥器	台架试验	7.88	3.35
未优化弧槽双螺旋式排肥器	台架试验	15.14	4.73
单螺旋排肥器	台架试验	23.36	4.28

根据台架验证与对比试验结果(表 5)计算可知:优化后的弧槽双螺旋式排肥器施肥精度 3.35%,施肥精度较高,优化后弧槽双螺旋式排肥器均匀性变异系数较未优化弧槽双螺旋式排肥器、单螺旋排肥器均匀性变异系数分别降低 7.26、15.48 个百分点,优化后的弧槽双螺旋式排肥器排肥均匀性好,有效解决了单螺旋排肥器排肥不均匀的问题。

4.3 不同转速时排肥性能台架试验

为了进一步分析螺旋排肥器的排肥性能,在转速 30 ~ 105 r/min 范围内(剔除较低转速情形),梯度为 15 r/min 的情况下对排肥器排肥性能进行测试,试验指标与台架试验相同,同时统计不同转速下的单圈排肥量,每组试验重复 5 次取平均值,转速对排肥性能影响试验如图 13 所示。

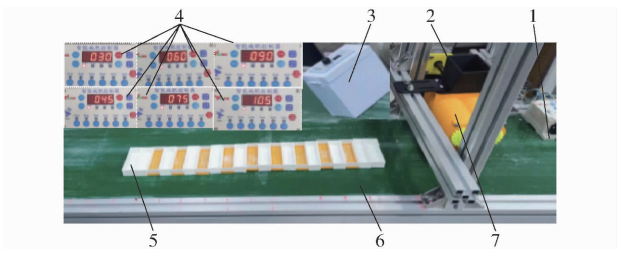


图 13 排肥性能台架试验装置

Fig. 13 Bench test device of fertilizer discharge performance

1. 电机控制器 2. 驱动电机 3. 传送带控制器 4. 不同转速电机控制器 5. 集肥盒 6. 弧槽双螺旋式排肥器 7. 传送带

根据排肥性能台架试验(表 6)数据计算可知:转速 30 ~ 105 r/min 范围内均匀性变异系数随转速增大而降低,不同转速下均匀性变异系数小于 10%、施肥精度小于 5%,满足 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》中施肥均匀性与精度的要求,不同转速下单圈排肥量平均值为 69.12 g,平均相对偏差为 0.52%,表明不同转速下单圈排肥量稳定性较好。

表 6 排肥性能台架试验结果

Tab. 6 Bench test results of fertilizer discharge performance

转速/ (r·min ⁻¹)	均匀性变异 系数/%	施肥精度/%	单圈排肥量/g
30	9.12	4.85	68.56
45	7.96	4.29	68.96
60	7.88	3.35	69.64
75	7.52	3.78	69.33
90	7.33	3.71	69.38
105	6.98	4.43	68.86

5 结论

(1)通过单螺旋排肥器台架试验对其排肥特性

加以研究,在分析单螺旋排肥器排肥曲线特性的基础上,采用双排肥轮构成弧槽双螺旋式排肥器,并对弧槽双螺旋式排肥器的瞬时排肥特性进行了理论分析,得出了影响弧槽双螺旋式排肥器排肥均匀性的因素分别为螺距 S 、中心距 a 、弧槽半径 R_p 。

(2)以螺距 S 、中心距 a 、弧槽半径 R_p 为试验因素,并以均匀性变异系数为试验指标,进行了三因素三水平 Box - Behnken 试验。根据所建立的均匀性变异系数、施肥精度回归模型并利用 Design-Expert 8.0.6 软件得出试验因素对试验指标影响的变化规律,螺距对均匀性变异系数影响为极显著 ($P < 0.01$),中心距、弧槽半径对均匀性变异系数影响为显著 ($0.01 < P < 0.05$),螺距、中心距、弧槽半径对施肥精度影响为极显著 ($P < 0.01$),并在中心距 a

为 35 mm、 $y_1 \leq 10\%$ 、 $y_2 \leq 5\%$,制造成本最小的条件下,优化得到排肥器的最佳参数:螺距 S 为 35 mm,弧槽半径 R_p 为 17.5 mm。

(3)为验证优化分析结果的准确性,以史丹利复合肥为试验材料进行台架验证试验。试验结果表明:台架试验的均匀性变异系数、施肥精度与仿真试验的相对误差分别为 5.07%、4.69%,优化后弧槽双螺旋式排肥器施肥精度为 3.35%,施肥精度较高,优化后弧槽双螺旋式排肥器均匀性变异系数较未优化弧槽双螺旋式排肥器、单螺旋排肥器均匀性变异系数分别降低 7.26、15.48 个百分点,优化后的弧槽双螺旋式排肥器排肥均匀性好,有效解决了单螺旋排肥器排肥不均匀的问题,转速 30 ~ 105 r/min 范围内排肥性能稳定,证明排肥器具有实用性。

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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 1 - 19. (in Chinese)

[2] 胡红,李洪文,王庆杰,等. 玉米行间定点扎穴深施追肥机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(24): 26 - 35.
HU Hong, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of targeted hole-pricking and deep-application fertilizer applicator between corn rows[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 26 - 35. (in Chinese)

[3] 刘晓东,丁幼春,舒彩霞,等. 螺旋锥体离心式排肥器扰动防堵机理分析与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(12): 44 - 54.
LIU Xiaodong, DING Youchun, SHU Caixia, et al. Mechanism analysis and test of disturbance and blockage prevention of screw cone centrifugal fertilizer apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 44 - 54. (in Chinese)

[4] DHEERAJ M, ABHISHEK S, HARSH P, et al. A review of granular flow in screw feeders and conveyors[J]. Powder Technology, 2020, 366: 369 - 381.

[5] VAN LIEDEKERKE P, 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.

[6] 余书豪. 垂直螺旋输送机性能参数的优化设计[J]. 机械设计与制造, 2015(11): 215 - 218.
YU Shuhao. Optimization design of performance parameters of vertical screw conveyor[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(11): 215 - 218. (in Chinese)

[7] KRETZ D, CALLAU-MONJE S, HITSCHLER M, et al. Discrete element method (DEM) simulation and validation of ascrew feeder system[J]. Powder Technology, 2015, 287: 131 - 138.

[8] DEBAYAN M, NABENDU G. Study on filling factor of short length screw conveyor with flood-feeding condition[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(1): 1286 - 1291.

[9] ANTON F, HUBERT Z, GEORG B. Mass flowmeter for screw conveyors based on capacitive sensing[C] // IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference, Warsaw, Poland, 2007.

[10] 薛忠,赵亮,王凤花,等. 基于离散元法的螺旋式排肥器性能模拟试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(5): 548 - 553.
XUE Zhong, ZHAO Liang, WANG Fenghua, et al. Performance simulation test of the spiral fertilizer distributor based on discrete element method[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2019, 45(5): 548 - 553. (in Chinese)

[11] 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 pneumatic centralized fertilizer distribution device based on CFD - DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 81 - 89. (in Chinese)

[12] 廖宜涛,高丽萍,廖庆喜,等. 油菜精量联合直播机深施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 65 - 75.
LIAO Yitao, GAO Liping, LIAO Qingxi, et al. Design and test of side deep fertilizing device of combined precision rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 65 - 75. (in Chinese)

[13] 戚江涛,蒙贺伟,坎杂,等. 基于 EDEM 的双螺旋奶牛饲喂装置给料性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 65 - 71.
QI Jiangtao, MENG Hewei, KAN Za, et al. Analysis and test of feeding performance of dual-screw cow feeding device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 65 - 71. (in Chinese)

- [15] 张涛,李英,宋树民,等. 基于柔性夹持的青菜头收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):162-169.
ZHANG Tao, LI Ying, SONG Shumin, et al. Design and experiment of tumorous stem mustard harvester based on flexible gripping[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 162-169. (in Chinese)
- [16] 蔡佳麟,张佳喜,叶尔波拉提·铁木尔,等. 夹持带式棉秆收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(10):152-160.
CAI Jialin, ZHANG Jiaxi, YEERBOLATI · Tiemuer, et al. Design and test of clamping belt cotton straw harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 152-160. (in Chinese)
- [17] VAGHELA P, PRAJAPATI J. Integrated symmetric and asymmetric involute spur gear modelling and manufacturing[J]. Materials Today, 2020, 22(4): 1911-1920.
- [18] 张晋苹. 修形齿轮端面重合度的计算[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(1): 91-93.
ZHANG Jinping. Transverse contact ratio calculation of profile modification gear[J]. Machine Design and Research, 2018, 34(1): 91-93. (in Chinese)
- [19] XU R, ZHANG J, WANG J G, et al. Nonlinear dynamic modelling and analysis for a spur gear pair considering tooth profile deviation based on tooth contact analysis[J]. Journal of Vibration Engineering and Technologies, 2021, 9: 1039-1057.
- [20] QIAN Z J, JIN C Q, ZHANG D G. Multiple frictional impact dynamics of threshing process between flexible tooth and grain kernel[J]. Journal of Vibration Engineering and Technologies, 2017, 141(19): 276-285.
- [21] 黄小平,李善鹏,田诗豪,等. 刚性球冲击悬臂梁诱发的大位移研究:半解析解和试验[J]. 物理与工程, 2020, 30(5): 132-138.
HUANG Xiaoping, LI Shanpeng, TIAN Shihao, et al. Large displacement induced by a rigid sphere impact on cantilever: semi analytical solution and experiment[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(5): 132-138. (in Chinese)
- [22] WEI H, PAN O B, ADETORO E, et al. Dynamic large deformation analysis of a cantilever beam[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2020, 174: 183-204.
- [23] 王金武,关睿,高鹏翔,等. 胡萝卜联合收获机单圆盘对顶切割装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 73-81.
WANG Jinwu, GUAN Rui, GAO Pengxiang, et al. Design and experiment of single disc to top cutting device for carrot combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 73-81. (in Chinese)
- [24] 金鑫,杜新武,王世光,等. 胡萝卜收获机根茎分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 82-89.
JIN Xin, DU Xinwu, WANG Shiguang, et al. Design and experiment of stems cutting device for carrot harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 82-89. (in Chinese)

(上接第 125 页)

- [14] 宋欢. 定量螺旋输送机的优化设计及模拟[D]. 青岛:青岛科技大学, 2016.
SONG Huan. Optimization design and simulation of quantitative screw conveyor[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2016. (in Chinese).
- [15] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社, 2018.
- [16] 杨文武,方龙羽,罗锡文,等. 螺旋排肥器排肥口参数对排肥性能影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(17): 1-8.
YANG Wenwu, FANG Longyu, LUO Xiwen, et al. Experimental study on the effect of the parameters of the spiral fertilizer feeder on the performance of the fertilizer[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(17): 1-8. (in Chinese)
- [17] 肖文立,廖宜涛,单伊尹,等. 油菜直播机四头螺旋双行排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 68-77.
XIAO Wenli, LIAO Yitao, SHAN Yiyin, et al. Design and experiment of quad-screw double-row fertilizer apparatus for rape seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 68-77. (in Chinese)
- [18] 机械设计选用手册编委会. 机械工程师手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [19] MOYSEY P A, THOMPSON M R. Modelling the solids inflow and solids conveying of single-screw extruders using the discrete element method[J]. Powder Technology, 2005, 153(2): 95-107.
- [20] 陈雄飞,罗锡文,王在满,等. 两级螺旋排肥装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 10-16.
CHEN Xiongfei, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of fertilizer distribution apparatus with double-level screws[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 10-16. (in Chinese)
- [21] 陈进,周韩,赵湛,等. 基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 79-83.
CHEN Jin, ZHOU Han, ZHAO Zhan, et al. Analysis of rice seeds motion on vibrating plate using EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 79-83. (in Chinese)
- [22] YU Yaowei, HENRIKSAXE N. Experimental and DEM study of segregation of ternary size particles in a blast furnace top bunker model[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65: 5237-5250.
- [23] SUGIRBAY A M, ZHAO J, NUKESHEV S O, et al. Determination of pin-roller parameters and evaluation of the uniformity of granular fertilizer application metering devices in precision farming[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 179: 105835.
- [24] 汪小岳,陈满,孙国祥,等. 冬小麦变量施肥机控制系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊2): 88-92.
WANG Xiaochan, CHEN Man, SUN Guoxiang, et al. Design and test of control system on variable fertilizer applicator for winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 2): 88-92. (in Chinese)