

斜口螺旋精控排肥器优化设计与试验

顿国强^{1,2} 吴星澎² 纪欣鑫² 纪文义³ 马洪岩⁴

(1. 哈尔滨剑桥学院智能农机装备工程实验室, 哈尔滨 150069; 2. 东北林业大学机电工程学院, 哈尔滨 150040;
3. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 4. 黑龙江睿龙创新科技有限责任公司, 哈尔滨 150050)

摘要: 为解决螺旋排肥器排肥流量不均匀影响精控施肥的问题,在通过排肥过程肥料运动状态仿真分析确定其排肥不均原因的基础上,采用倾斜排肥口的结构设计以提升排肥均匀性。利用 EDEM 建立斜口螺旋排肥器仿真模型,以斜口长度 x_1 、斜口角度 x_2 、开口宽度 x_3 为试验因素,排肥流量变异系数为试验指标,进行二次通用旋转组合设计试验研究。试验结果表明:试验因素对试验指标的影响主次顺序为 x_3 、 x_2 、 x_1 ,且当 x_1 为 105 mm、 x_2 在 $30^{\circ} \sim 44^{\circ}$ 范围内、 x_3 在 40.05 ~ 55.00 mm 范围内时,排肥流量变异系数 σ 小于 15%,排肥均匀性较佳。采用台架试验对传统及斜口螺旋排肥器进行对比试验,结果证明:转速 60 r/min 时斜口螺旋排肥器排肥流量变异系数 σ 为 13.59%,与理论优化值相吻合,且斜口螺旋排肥器均优于传统螺旋排肥器。同时基于实测的排肥器排肥转速流量曲线,设计一种排肥控制器并进行台架试验,结果表明其可实现精控施肥。

关键词: 精控施肥; 均匀性; 螺旋排肥器; EDEM; 结构优化

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)07-0167-08 **OSID:** 

Optimization Design and Experiment of Oblique Opening Spiral Precision Control Fertilizer Apparatus

DUN Guoqiang^{1,2} WU Xingpeng² JI Xinxin² JI Wenyi³ MA Hongyan⁴

(1. Intelligent Agricultural Machinery Equipment Engineering Laboratory, Harbin Cambridge University, Harbin 150069, China
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China
3. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
4. Heilongjiang Ruilong Innovation Technology Co., Ltd., Harbin 150050, China)

Abstract: In order to solve the problem of uneven fertilizer discharge flow of screw fertilizer feeder affecting precision control fertilization, the reason for uneven discharge of fertilizer is determined based on the simulation analysis of fertilizer movement during the discharge process, the structure design of oblique opening fertilizer discharge port is adopted to improve the uniformity of fertilizer discharge. Using EDEM to establish simulation model of oblique opening screw fertilizer distribution apparatus. Taking the length of oblique opening x_1 , angle of oblique opening x_2 , width of opening x_3 as the test factors, and the coefficient of variation of fertilizer discharge as the test index, a secondary general rotary combination design experiment was conducted. The test results showed that the order of influence of test factors on test indexes was x_3 、 x_2 、 x_1 , and when x_1 was 105 mm, x_2 was within range of $30^{\circ} \sim 44^{\circ}$, x_3 was within range of 40.05 ~ 55.00 mm, the variation coefficient of fertilizer discharge discharge was less than 15%, and the uniformity of fertilizer discharge was better. The bench test was used to compare the traditional and oblique opening screw fertilizer distribution apparatus. The results showed that the coefficient of variation of fertilizer discharge of the oblique opening screw fertilizer distribution apparatus was 13.59% at speed of 60 r/min, which was consistent with the theoretical optimization value, and the oblique opening screw fertilizer distribution apparatus were better than the traditional screw fertilizer distribution apparatus. At the same time, based on the measured fertilizer discharge speed flow curve of the fertilizer discharger, a fertilizer discharge controller was developed and bench test was carried out. The results showed that it can

achieve precise fertilization. The research result can provide some reference for improving the design of screw fertilizer distribution apparatus.

Key words: precision fertilization; uniformity; spiral fertilizer ejector; EDEM; structural optimization

0 引言

农作物种植过程中施肥与追肥是极其重要的一环^[1-4],合理施肥可以提高农作物单位面积产量^[5]。现有研究表明,不合理的施肥会对环境造成污染且浪费资源。因此,肥料的精准施用对于肥料的减施增效、降低环境污染等具有重要意义^[6]。

螺旋排肥器具有结构简单、安装方便、输送量可调、单圈排肥量稳定等优点^[7],在农业生产中应用广泛。工作时可通过螺旋叶片的旋转强制对颗粒状或粉状物料进行输送^[8]。现有螺旋排肥器因特殊排肥原理而在排肥螺旋转速较低时,排肥流量波动较大,无法精量排肥^[9]。近年来国内外相关学者为提高肥料的精准施用效果,针对螺旋排肥器进行了大量研究^[10]。

肖文立等^[11]设计了一种四头螺旋双行排肥器,通过离散元仿真分析得出,排肥螺旋为4头、螺距为24 mm时排肥性能最佳,并通过田间试验证明了仿真优化的正确性。薛忠等^[12]通过仿真的方式分析出影响螺旋排肥器排肥均匀性及排肥量的主次因素依次为排肥螺旋转速、螺距、螺旋叶片直径。杨文武等^[13]针对排肥器排肥流量随螺旋转动变化而造成排肥均匀性降低的问题,设计了一种侧面出肥式螺旋排肥器,并通过离散元仿真与台架试验相结合的方法,优化得出最佳结构。上述研究证明因螺旋排肥器结构缺陷,其转动时排肥均匀性受到排肥螺旋转速及排肥口结构形状的影响较大。因此,本研究通过分析瞬时排肥特性,确定螺旋排肥器排肥不均原因,将传统圆形出肥口改进成斜口出肥口,优化排肥器结构,以期提高排肥流量均匀性。

本文采用改进螺旋排肥器排肥口的方式提升排肥流量均匀性,以实现精控施肥的目的。并通过基于响应曲面法的离散元仿真试验优化斜口排肥口结构参数。运用3D快速成型技术制造斜口螺旋排肥器,进行台架试验,与仿真结果及传统螺旋排肥器的排肥均匀性进行对比分析。并设计一种通过控制转速来实现精控施肥的排肥控制器,以期螺旋排肥器的优化设计提供参考。

1 排肥器理论计算与结构优化

1.1 螺旋排肥器结构组成

如图1所示,螺旋排肥器主要由排肥器外壳以

及排肥螺旋组成,入肥口及排肥口分别装配于外壳前后两侧上下端^[14]。依据市购螺旋排肥器,确定排肥螺旋参数:排肥螺旋外径 $D = 72$ mm,螺旋内径 $d = 30$ mm,螺距 $S = 30$ mm,厚度 $b = 2$ mm,排肥口半径 $r_1 = 30$ mm。

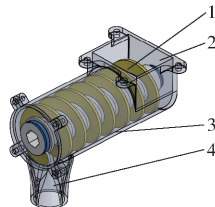


图1 螺旋排肥器结构示意图

Fig.1 Structural diagram of screw fertilizer distribution apparatus

1. 排肥螺旋 2. 入肥口 3. 螺旋排肥器壳体 4. 排肥口

1.2 螺旋排肥器关键参数确定

排肥器作业时肥箱内的肥料通过重力作用落入壳体内,通过排肥螺旋旋转作业将入肥口处的肥料输送至排肥口排出。肥料输送过程中受到排肥螺旋上螺旋叶片的法向推力和切向摩擦力共同作用产生的轴向和周向移动,颗粒轴向位移过程中伴随着转动^[15]。

1.2.1 螺旋排肥器转速

螺旋排肥器排肥关键部件为排肥螺旋,其转速增加时,排肥流量均匀性也随之提高。但排肥螺旋转速大于极限转速 $n_{\max}$ 时,排肥螺旋于型腔内主要对肥料起搅拌作用,对肥料轴向推进位移较小,无法正常排肥^[16]。此时,肥料颗粒所受离心力的最大临界值与其自身重力之间的关系为

$$m\omega_{\max}^2 r \leq mg \quad (1)$$

$$\frac{2\pi n_{\max}}{60} \leq \sqrt{\frac{g}{r}} \quad (2)$$

当肥料物理特性不同时,其关系式为

$$\frac{\pi n_{\max}}{30} \leq K \sqrt{\frac{g}{r}} \quad (3)$$

$$n_{\max} = \frac{30K}{\pi} \sqrt{\frac{g}{r}} = \frac{30K}{\pi} \sqrt{\frac{2g}{D}} \quad (4)$$

令 $A = 30K\sqrt{2g}/\pi$,则螺旋排肥器最高转速计算公式为

$$n_{\max} \leq \frac{A}{\sqrt{D}} \quad (5)$$

式中 r ——排肥螺旋半径,m

m ——肥料颗粒质量,kg

g ——重力加速度, m/s^2
 $\omega_{\max}$ ——排肥螺旋最大角速度, rad/s
 K ——物料综合系数
 A ——物料综合特性系数, 取 50^[13]

根据式(5)计算得出螺旋排肥器极限转速 $n_{\max}$ 为 186.339 r/min。

1.2.2 理论排肥量

本文选取江苏晋煤恒盛化工股份有限公司生产的尿素肥料, 抽取其中 100 粒作为试验材料, 测量三维尺寸 L 、 B 、 H 及密度 ρ 为 0.948 g/cm^3 。由

$$D_1 = \sqrt[3]{LBH} \tag{6}$$

$$\varphi = \frac{D_1}{L} \times 100\% \tag{7}$$

式中 L ——颗粒长度, mm
 B ——颗粒宽度, mm
 H ——颗粒高度, mm

计算颗粒等效直径 D_1 为 2.05 mm; 球形率 φ 为 96.12%。根据螺旋输送机构工作原理^[17-18], 有螺旋排肥器螺牙平均长度和单圈排肥量为

$$L_p = \sqrt{[\pi(D+d)/2]^2 + S^2} \tag{8}$$

$$q = \left[\frac{\pi(D^2 - d^2)S}{4} - b \frac{D-d}{2} L_p \right] \rho \mu \tag{9}$$

式中 μ ——排肥器型腔充填系数, 取 0.45^[19]
 S ——螺距, mm

计算得出 $L_p = 163 \text{ mm}$, $q = 40.14 \text{ g/r}$ 。

根据农艺要求, 每秒所需极限排肥量为

$$Q = \frac{Z E v_b}{10} \tag{10}$$

螺旋排肥器极限转速下, 每秒排肥量为

$$\delta = \frac{q n_{\max}}{60} \tag{11}$$

式中 Q ——每秒所需极限排肥量, g/s
 Z ——每公顷施肥量, kg/hm^2
 E ——排肥器作业垄宽, m
 v_b ——螺旋排肥器前进速度, m/s
 δ ——螺旋排肥器极限排肥量, g/s

查阅相关文献, 确定排肥器前进速度 v_b 为 2.5 m/s, 作业垄宽 E 为 0.6 m, 每公顷施肥量 Z 为 750 kg/hm^2 的条件下^[20-21], 通过式(10)得出所需极限排肥量 Q 为 112.5 g/s, 此时螺旋排肥器所需极限转速为 168.16 r/min, 小于螺旋排肥器极限转速, 并通过式(11)计算得出螺旋排肥器极限排肥量为 124.66 g/s。根据农艺要求可知, 螺旋排肥器所需排肥量 Q 应小于排肥量, 即螺旋排肥器可根据作物需肥量 Q 的变化, 在极限转速 $n_{\max}$ 范围内调节螺旋排肥器转速 n 。

结合式(8)~(10)可知, 螺旋排肥器实际作业时, 在螺旋排肥器结构尺寸 D 、 d 、 b 、 S , 所用肥料颗粒 ρ 、 μ , 作业垄宽 E 及机具前进速度 v_b 一定的情况下, 其排肥量主要与转速 n 相关, 转速变化时其排肥均匀性也随之变化。因此, 对排肥均匀性与转速变化之间的关系进行分析。

1.3 排肥流量不均匀特性分析

图 2 为传统螺旋排肥器离散元仿真一个转动周期内, 排肥螺旋与排肥口接触处肥料状态时序图。由图分析可知, 随着排肥螺旋转动, 排肥螺旋与排肥口之间相互位置也随之变化。3.1 s 时, 肥料送达排肥口, 无肥料排出; 3.5~3.8 s 时, 排肥口处肥料量快速增加, 瞬时排出量增大。而排肥螺旋与排肥口之间相互位置周期性变化, 且每个循环只有单个螺距参与排肥, 使得排肥口处排肥流量总体呈现出上下波动的状态^[22-24]。随着排肥螺旋转速增加, 单位时间内可同时排出多个螺距内肥料, 因此排肥流量均匀性受到排肥口结构及排肥螺旋转速的影响较大, 均匀性随着转速增加而变好。

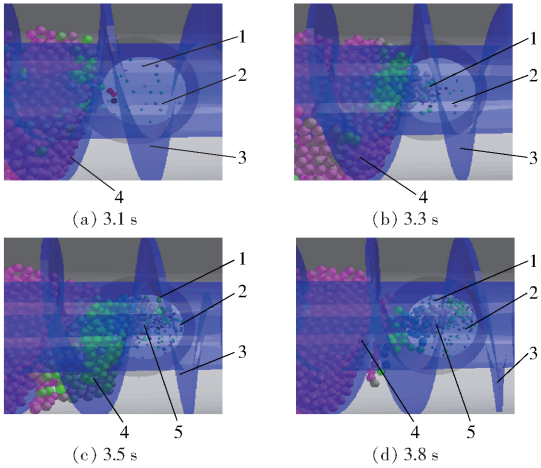


图 2 螺旋排肥器瞬态排肥效果

Fig.2 Instantaneous fertilizer discharge effect of screw fertilizer distribution apparatus

1. 落入地表的肥料颗粒 2. 排肥口 3. 螺旋叶片 4. 被螺旋叶片推进中的颗粒 5. 正在排肥的肥料颗粒

相关研究发现^[13], 排肥螺旋转速范围在 30~90 r/min 区间时排肥性能较好。本文采用固定排肥螺旋转速为 60 r/min, 对排肥口结构进行改进的方式以提高螺旋排肥器排肥均匀性。

1.4 排肥口结构改进

为提高排肥流量均匀性, 如图 3 所示, 将螺旋排肥器排肥口结构改进设计成斜口式。分析图 3 可知, 影响排肥均匀性的主要参数为斜口长度 x_1 、斜口角度 x_2 、开口宽度 x_3 。为使肥料颗粒顺利从斜口夹角处落入排肥口, 并便于斜口排肥口与下方排肥管相连接, 将斜口起始端夹角与终止端出口加工为

圆角,起始端及终止端圆角半径尺寸分别为 2 mm 及 16 mm。且为保证强度,将两圆角之间过渡区域加工为变半径圆角。因排肥口沿螺旋轴轴线方向包覆有多个螺距,肥料随排肥螺旋转动从排肥口斜口开口缓慢排出,未排出肥料随排肥螺旋转动继续向前移动排肥。使排肥过程中多个螺距同时排肥,提高了排肥流量均匀性。

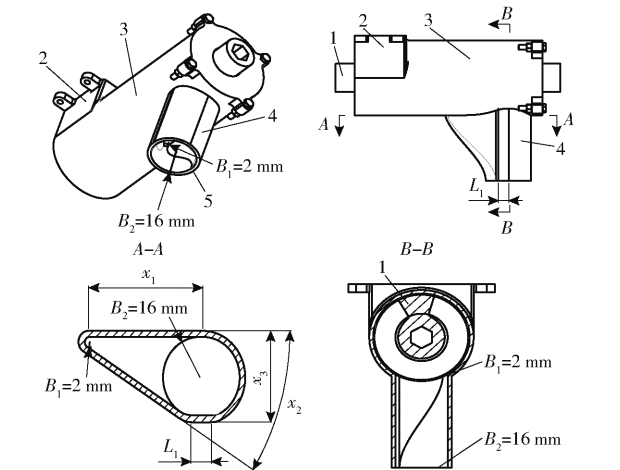


图 3 斜口螺旋排肥器排肥口改进示意图

Fig.3 Schematic of improvement of fertilizer discharge port of oblique opening spiral fertilizer distribution apparatus

1. 排肥螺旋 2. 入肥口 3. 螺旋排肥器壳体 4. 排肥口 5. 排肥口端面

2 斜口螺旋排肥器排肥性能仿真优化

2.1 仿真模型建立与参数设置

使用 EDEM 构建斜口螺旋排肥器仿真模型^[24-25],于肥箱内建立肥料颗粒工厂,设定总颗粒数为 10 000,排肥螺旋转速为 60 r/min。肥料质量监测区设置于集肥箱处,用以监测排肥器 3 s 内排出肥料颗粒总质量,总仿真过程为 18 s,仿真模型如图 4 所示。

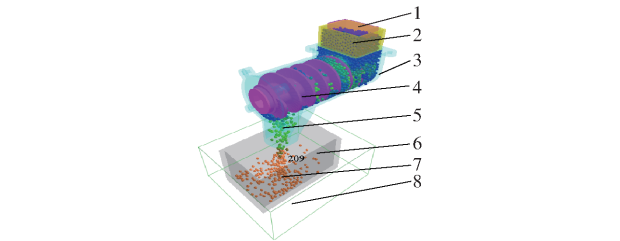


图 4 仿真模型

Fig.4 Simulation model

1. 颗粒工厂 2. 肥箱 3. 螺旋排肥器壳体 4. 排肥螺旋 5. 排肥口 6. 集肥箱 7. 肥料颗粒 8. 监测区

尿素颗粒球形率 φ 为 96.12%,半径标准差为 0.199 mm,因此将尿素颗粒看作直径为 2.05 mm 的球体。选取 EDEM 内置接触模型 Hertz - Mindlin (no slip) 作为尿素颗粒与尿素颗粒、尿素颗粒与排肥装

置之间的接触模型。参考文献[10],确定所选用的尿素肥料相关参数以及尿素肥料与排肥装置(PLA 塑料)之间的接触力学参数如表 1 所示。

表 1 离散元仿真参数		
Tab.1 Discrete element simulation parameters		
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

2.2 排肥性能评价方法

为分析斜口排肥口结构参数对排肥流量均匀性的影响,采用网格法对斜口螺旋排肥器的排肥流量变化进行数据统计。任意截取排肥器稳定排肥后排肥口下方监测区 3 s 内肥料堆积质量,以 0.5 s 时间间隔分成 6 个时间段,分别统计 7 个时间点对应的监测区内肥料堆积质量,记为 A_0 、 A_1 、 $\cdots$ 、 A_6 ,计算其 0.5 s 内排肥质量为

$$m_i = A_i - A_{i-1} \quad (i = 1, 2, \cdots, 6) \quad (12)$$

式中 m_i ——监测区间第 i 个时间段内的排肥质量, g
 A_i ——第 i 个时间点监测区内肥料堆积质量, g

分别计算各时间段内肥料平均排肥质量、标准差以及排肥流量变异系数 σ 。

排肥器的排肥流量均匀性与排肥流量变异系数 σ 紧密相关,排肥流量变异系数 σ 越低证明排肥流量均匀性越佳。因此将排肥流量变异系数 σ 作为试验评价标准,分析转速固定时不同斜口结构参数下的排肥流量均匀性变化趋势。

2.3 试验因素

采用二次通用旋转组合试验设计方法,对斜口长度 x_1 、斜口角度 x_2 、开口宽度 x_3 进行优化,其因素水平编码如表 2 所示。

表 2 因素编码			
Tab.2 Factor coding			
编码	因素		
	x_1/mm	$x_2/(\circ)$	x_3/mm
1.682	130.00	80.00	55.00
1	119.87	69.87	49.93
0	105.00	55.00	42.50
-1	90.13	40.13	35.07
-1.682	80.00	30.00	30.00

肥料颗粒被排肥螺旋推送至斜口排肥口时,

一部分肥料颗粒与斜口角度 x_2 相接触,若斜口开口过小,则此部分肥料不易及时排出而继续向前推进。因此,为保证排肥稳定性,斜口角度 x_2 及开口宽度 x_3 不宜过小,选择斜口角度 x_2 为 $30^{\circ} \sim 80^{\circ}$, 开口宽度 x_3 为 $30 \sim 55 \text{ mm}$ 。斜口对侧长度 L_1 随斜口角度 x_2 及斜口长度 x_1 的增加而增加。为确保排肥口出口形状,当斜口角度 x_2 为 30° 时,斜口长度 x_1 不应小于 80 mm , 因此,确定斜口长度 x_1 范围为 $80 \sim 130 \text{ mm}$ 。

2.4 试验方案与结果

表 3 为斜口螺旋排肥器试验方案及 EDEM 仿真试验结果。通过 Design-Expert 8.0 软件对表 3 进行回归分析,分析试验因素变化时,排肥流量变异系数的变化规律,其方差分析结果见表 4。分析得知,排肥流量变异系数回归模型为极显著 ($P = 0.000\ 2 < 0.01$)。回归模型失拟项不显著 ($P = 0.735\ 1 > 0.05$),表明其回归模型拟合较好。对于排肥流量变异系数 σ 来说, x_1 、 x_2 、 x_3 均影响显著 ($P < 0.05$), 其中 x_2 、 x_3 影响极显著 ($P < 0.01$),具体影响趋势为 $x_3 > x_2 > x_1$,各因素与排肥流量变异系数 σ 的回归方程为

$$\sigma = -327.595\ 8 + 5.039\ 9x_1 + 4.075\ 0x_2 + 0.426\ 0x_3 - 0.020\ 1x_1x_2 + 0.017\ 8x_1x_3 + 0.023\ 3x_2x_3 - 0.023\ 41x_1^2 - 0.024\ 5x_2^2 - 0.049\ 7x_3^2 \quad (13)$$

表 3 试验方案与结果
Tab.3 Schemes and results of test

编号	因素			排肥流量变异 系数 $\sigma/\%$
	x_1/mm	$x_2/(^{\circ})$	x_3/mm	
1	90.13	40.13	35.07	30.21
2	119.87	40.13	35.07	27.33
3	90.13	69.87	35.07	38.28
4	119.87	69.87	35.07	23.19
5	90.13	40.13	49.93	10.82
6	119.87	40.13	49.93	21.37
7	90.13	69.87	49.93	34.76
8	119.87	69.87	49.93	21.95
9	80.00	55.00	42.50	32.78
10	130.00	55.00	42.50	18.33
11	105.00	30.00	42.50	17.97
12	105.00	80.00	42.50	31.69
13	105.00	55.00	30.00	43.19
14	105.00	55.00	55.00	21.59
15	105.00	55.00	42.50	36.34
16	105.00	55.00	42.50	40.91
17	105.00	55.00	42.50	38.84
18	105.00	55.00	42.50	36.96
19	105.00	55.00	42.50	47.87
20	105.00	55.00	42.50	36.93

2.5 响应曲面分析

采用响应曲面图的方式,分析试验因素与试验

表 4 方差分析
Tab.4 Variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1 686.87	9	187.43	12.66	0.000 2
x_1	145.21	1	145.21	9.81	0.010 7
x_2	194.39	1	194.39	13.13	0.004 7
x_3	323.19	1	323.20	21.83	0.000 9
x_1x_2	158.15	1	158.15	10.68	0.008 5
x_1x_3	30.85	1	30.85	2.08	0.179 4
x_2x_3	52.99	1	52.99	3.58	0.087 8
x_1^2	384.36	1	384.36	25.96	0.000 5
x_2^2	423.46	1	423.46	28.61	0.000 3
x_3^2	108.82	1	108.82	7.35	0.021 9
残差	148.04	10	14.80		
失拟差	52.63	5	10.53	0.55	0.735 1
误差	95.40	5	19.08		
总和	1 834.89	19			

指标之间的关系。

如图 5a 所示,随着斜口角度的增加,排肥流量变异系数于斜口长度较低处呈增大趋势,于斜口长度较高处呈先增大后减小趋势。排肥流量变异系数随着斜口长度增加,于斜口角度较低处呈先增大后减小趋势,于斜口角度较高处呈逐渐下降趋势。

分析图 5b 可知,随着斜口角度的增加,排肥流量变异系数呈增大趋势,随着开口宽度的增加,排肥流量变异系数呈下降趋势。

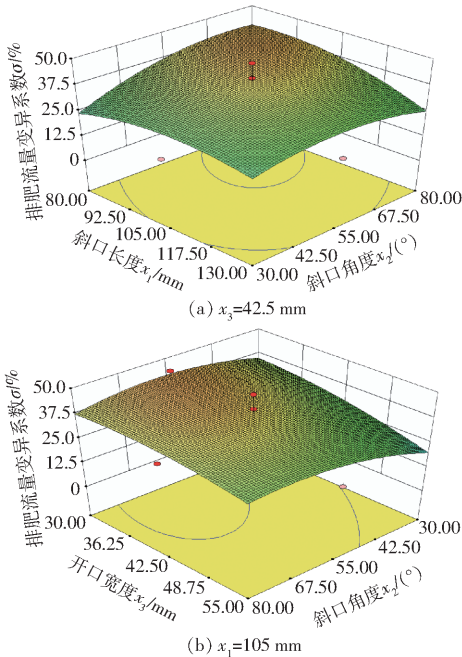


图 5 试验因素对排肥流量变异系数影响的响应曲面
Fig.5 Effects of experimental factors on response surface of fertilizer discharge coefficient of variation

2.6 参数优化

为确定最佳斜口排肥口结构参数,对斜口结构

参数进行优化,参考文献[12],将排肥流量变异系数 σ 设定为小于15%。分析表4可知, x_1 对排肥流量变异系数 σ 影响较小,为减小加工成本,确定斜口长度 x_1 为105 mm,对 x_2 、 x_3 进行优化,其优化结果为图6。图6中黄色阴影区域为 x_2 及 x_3 最佳组合区域,分析可知, x_2 为 $30^\circ \sim 44^\circ$, x_3 为45.05~55.00 mm时,其排肥流量变异系数 σ 小于15%。

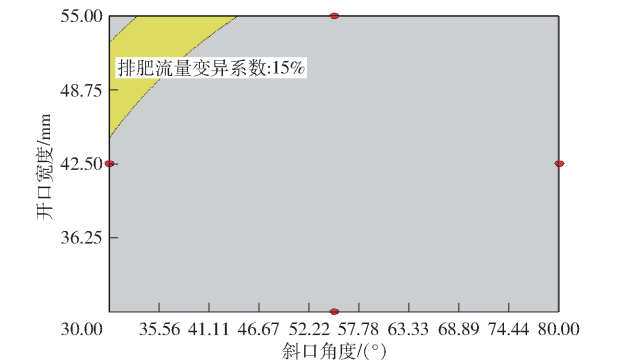


图6 参数优化分析结果

Fig.6 Parameter optimization analysis results

进行仿真验证试验,为便于样机加工,其斜口排肥口参数于优化区间内选择 $x_1=105\text{ mm}$, $x_2=30^\circ$, $x_3=50\text{ mm}$ 。仿真试验证明,其优化后排肥流量变异系数 σ 为14.31%,符合理论优化最佳值范围。

3 台架试验

如图7所示,为验证排肥口参数优化的正确性,通过台架试验测量排肥均匀性并进行对比分析,试验地点为东北林业大学智能农机装备实验室,肥料选取江苏晋煤恒盛化工股份有限公司生产的尿素肥料。试验装置主要包括传统螺旋排肥器及斜口螺旋排肥器。确定斜口参数为 $x_1=105\text{ mm}$, $x_2=30^\circ$, $x_3=50\text{ mm}$ 。试验转速分别设置为30、60、90、120、150、180 r/min,传送带前进速度为0.5 m/s。以排肥流量变异系数及排肥流量作为试验指标,于稳定排肥后记录数据,进行3次重复试验。排肥流量变异系数对比分析结果如图8所示,斜口螺旋排肥器排肥流量变化趋势如图9所示。

对比仿真验证结果与图8台架试验结果可知,斜口螺旋排肥器转速为60 r/min时,台架试验结果为13.59%,与仿真优化结果偏差0.72个百分点,证明了优化的正确性。且台架试验结果表明,斜口螺旋排肥器在不同转速情况下,排肥流量变异系数 σ 均低于传统型螺旋排肥器,表明斜口螺旋排肥器排肥效果更佳。

图9为排肥流量试验结果拟合曲线,其函数方程为 $y=0.7x+0.47$,决定系数 $R^2=0.99$,排肥流量随着转速的增加而增加,且两者之间呈线性正相关,

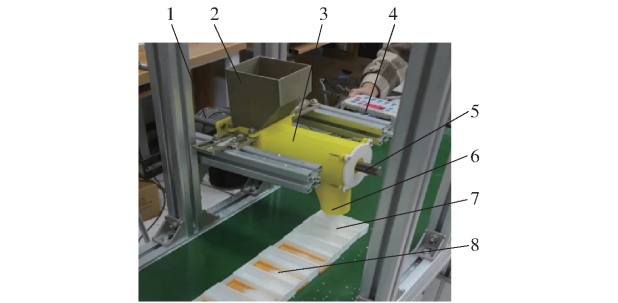


图7 台架验证试验

Fig.7 Bench verification test

1. 电机 2. 肥箱 3. 螺旋排肥器壳体 4. 电控排肥装置 5. 排肥螺旋 6. 出肥口 7. 肥料颗粒 8. 肥料收集盒

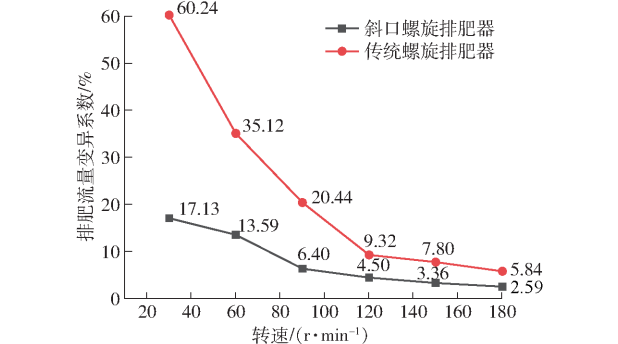


图8 台架试验验证结果

Fig.8 Bench test verification results

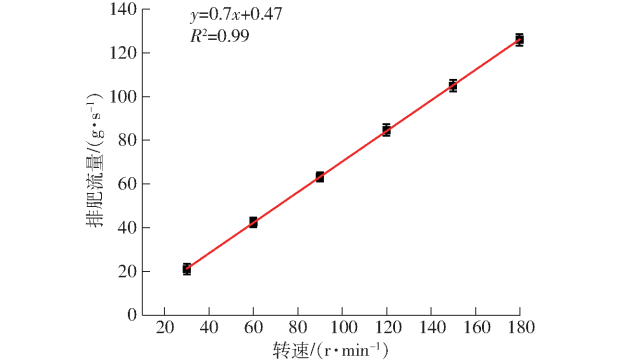


图9 排肥流量与转速变化拟合曲线

Fig.9 Fitting curve between fertilizer discharge and rotating speed

因此,可实现通过调节排肥器转速来精控排肥量的设计目的。

4 电控排肥器试验

如图10所示,为实现精控施肥,与黑龙江睿龙创新科技有限责任公司合作开发一种电控排肥控制器。其控制系统基于方程 $y=0.7x+0.47$ 进行设计,施肥时,可通过北斗GPS卫星导航系统确定施肥机械的作业速度。为验证控制器精控排肥性能,于30~180 r/min任选6个转速进行3次重复验证试验,取其均值作为试验结果,并与预设值进行对比,结果如图11所示。分析可知,基于电控系统控

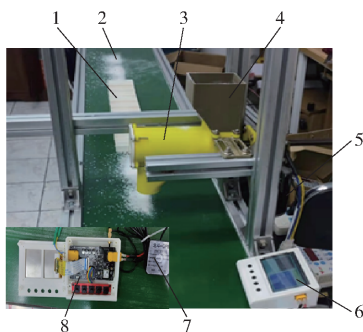


图 10 电控排肥装置台架测试试验

Fig. 10 Bench verification test for testing electronically controlled fertilizer emission controller

1. 肥料收集盒 2. 肥料颗粒 3. 螺旋排肥器壳体 4. 肥箱 5. 电机 6. 电控排肥系统 7. GPS 接收器 8. PCB 印制电路板

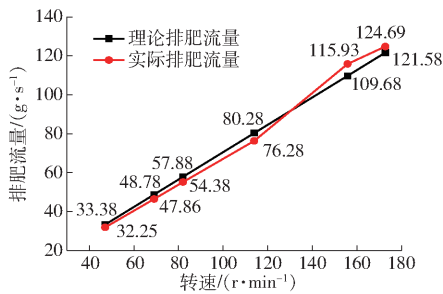


图 11 排肥流量对比曲线

Fig. 11 Comparison curves of fertilizer discharge

制的排肥器排肥流量与预设值平均偏差为 3.15 个百分点,证明了电控系统可通过控制转速来实现精控施肥,满足设计要求。

5 结论

(1)改进传统螺旋排肥器出肥口结构,并通过理论分析其排肥量以及最高转速,确定影响排肥均匀性的主要因素为斜口角度及开口宽度。

(2)通过二次回归正交组合试验设计方法分析影响排肥流量变异系数的主要因素,确定斜口排肥口最优参数组合为:斜口长度为 105 mm、斜口角度范围为 30°~44°、开口宽度范围为 45.05~55.00 mm 时排肥流量变异系数小于 15%。

(3)通过台架试验分别测试斜口螺旋排肥器与传统螺旋排肥器排肥均匀性,其结果表明,转速 60 r/min 时,斜口排肥器排肥流量变异系数为 13.59%,与理论优化最佳值范围相吻合,证明了优化结果的准确性,且其排肥均匀性均显著优于传统排肥器。设计一种电控排肥系统,通过改变转速调节斜口排肥流量满足玉米田间实际需求。

参 考 文 献

[1] 张东超,汤智辉,何义川,等. 基于 EDEM 离散元法的分层施肥靴仿真与试验[J]. 农机化研究,2020,42(2):146-151.
ZHANG Dongchao,TANG Zhihui,HE Yichuan,et al. Simulation and experimen of layered fertilizing boots based on EDEM discrete element method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2020,42(2):146-151. (in Chinese)

[2] 吴南. 精量玉米免耕播种施肥机漏播补偿与穴施肥控制研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2018.
WU Nan. Research on control of precision corn no-tillage seeding & fertilizing machine miss-seeding compensation and hole fertilization[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University,2018. (in Chinese)

[3] 李坤,袁文胜,张文毅,等. 玉米施肥技术与施肥机械的研究现状及趋势[J]. 农机化研究,2017,39(1):264-268.
LI Kun,YUAN Wensheng,ZHANG Wenyi,et al. Research status and development trend of corn fertilizing technology and fertilizing machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2017,39(1):264-268. (in Chinese)

[4] 王圆明,宋树民,庞有伦,等. 单行精量玉米播种施肥机的优化设计[J]. 中国农机化学报,2016,37(11):15-19.
WANG Yuanming,SONG Shumin,PANG Youlun,et al. Optimization design of the single precision corn seeding and fertilizing machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechabnization,2016,37(11):15-19. (in Chinese)

[5] 张北赢,陈天林,王兵,等. 长期施用化肥对土壤质量的影响[J],中国农学通报,2010,26(11):182-187.
ZHANG Beiying,CHEN Tianlin,WANG Bing,et al. Effects of long-term uses of chemical fertilizers on soil quality[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2010,26(11):182-187. (in Chinese)

[6] 顿国强,于春玲,郭艳玲,等. 叠片式啮合圆弧齿轮排肥器设计与仿真试验[J]. 中国农业科技导报,2020,22(5):78-85.
DUN Guoqiang,YU Chunling,GUO Yanling,et al. Design and simulation test of laminated-type meshing arc gear fertilizer device [J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2020,22(5):78-85. (in Chinese)

[7] 刘春飞,李艳洁,王玉,等. U 形筒螺旋输送机输送颗粒物料的离散元仿真[J]. 中国农业大学学报,2018,23(6):151-159.
LIU Chunfei,LI Yanjie,WANG Yu,et al. Discrete element simulations on the transporting particle materials of U-shape screw conveyor[J]. Journal of China Agricultural University,2018,23(6):151-159. (in Chinese)

[8] 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)

[9] 王强. 2CMG-4 型马铃薯播种机排肥系统的设计研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2014.
WANG Qiang. Design and research on the 2CMG-4 potato planter distributing system[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University,2014. (in Chinese)

- [10] 顿国强,于春玲,郭艳玲,等.双齿轮式排肥器设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(3):87-96.
DUN Guoqiang, YU Chunling, GUO Yanling, et al. Design and experiment of double-gear type fertilizer apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 87-96. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] 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 of the effects of discharge port parameters on the fertilizing performance for fertilizer distribution apparatus with screw[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(17): 1-8. (in Chinese)
- [14] 胡国明.颗粒系统的离散元素法分析仿真[M].武汉:武汉理工大学出版社,2010.
- [15] UCHIDA K, OKAMOTO K. Measurement technique on the diffusion coefficient of power flow in a screw feeder by X-ray visualization[J]. Powder Technology, 2008, 187(2): 138-145.
- [16] 顿国强,刘文辉,杜佳兴,等.弧槽双螺旋式排肥器优化设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(10):118-125,174.
DUN Guoqiang, LIU Wenhui, DU Jiaxing, et al. Optimal design and experiment of arc-groove double-spiral fertilizer discharge device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 118-125, 174. (in Chinese)
- [17] 《运输机械设计选用手册》编辑委员会.运输机械设计选用手册[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [18] 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)
- [19] 张国忠,王洋,刘浩蓬,等.离心侧抛式藕田撒肥器设计与试验[J].农业工程学报,2021,37(19):37-47.
ZHANG Guozhong, WANG Yang, LIU Haopeng, et al. Design and experiments of the centrifugal side throwing fertilizer spreader for lotus root fields[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(19): 37-47. (in Chinese)
- [20] 张桓语.密度与施肥量对玉米沈农 T100 农艺性状及产量的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2021.
ZHANG Huanyu. Effects of density and fertilizer amount on agronomic characerts and yield of corn Shennong T100[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [21] 李振.中耕追肥机施肥铲的设计与试验研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2014.
LI Zhen. Design and experimental study on fertilizer shover of fertilizer cultivator[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [22] 郭华,周健,张金建,等.基于离散单元法的氢氧化锂粉末螺旋输送机优化设计[J].浙江理工大学学报(自然科学版),2023,49(2):237-245.
GUO Hua, ZHOU Jian, ZHANG Jinjian, et al. Optimization design of lithium hydroxide powder screw conveyor based on discrete element method[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences Edition), 2023, 49(2): 237-245. (in Chinese)
- [23] 王涛.螺旋输送机出料口设计[J].中国井矿盐,2019,50(3):25-27.
WANG Tao. Design on material export of spiral conveyer[J]. China Well and Rock Salt, 2019, 50(3): 25-27. (in Chinese)
- [24] 宋欢,李勇,马迎亚,等.基于离散元法的定量螺旋输送机的优化研究[J].起重运输机械,2016(2):30-34.
SONG Huan, LI Yong, MA Yingya, et al. Optimal study on rationed screw conveyor based on distrete element method[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2016(2): 30-34. (in Chinese)
- [25] 刘彩玲,黎艳妮,宋建农,等.基于 EDEM 的离心甩盘撒肥器性能分析与试验[J].农业工程学报,2017,33(14):32-39.
LIU Cailing, LI Yanni, SONG Jiannong, et al. Performance analysis and experiment on fertilizer spreader with centrifugal swing disk based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 32-39. (in Chinese)