

顿国强,李鑫,纪欣鑫,等.同向双螺旋排肥器优化设计与试验[J].华中农业大学学报,2024,43(5):278-287.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.05.031

同向双螺旋排肥器优化设计与试验

顿国强^{1,2},李鑫²,纪欣鑫²,盛泉宝²,纪文义³

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

摘要 针对传统排肥器存在施肥不均而造成肥料利用率低问题,设计了一种双排肥轮结构的同向双螺旋排肥器,通过理论分析确定排肥器的理论排肥量及影响排肥均匀性的参数,以排肥轮螺距、中心距、叶片高度为试验因素,以排肥均匀性波动系数和轴向平均速度为试验指标,进行三因素三水平Box-Behnken试验。结果显示:排肥轮螺距对排肥均匀性波动系数影响极显著,排肥轮中心距、叶片高度对排肥均匀性波动系数影响显著,排肥轮螺距、中心距、叶片高度对轴向平均速度影响极显著,在排肥轮中心距为48 mm,螺距32.5~33.2 mm、叶片高度13.5~14.7 mm时,排肥均匀性波动系数≤10%、肥料轴向平均速度≥30 mm/s,排肥器作业性能最佳。在最优参数组合下排肥均匀性波动系数台架试验与仿真试验相对误差为1.47%、单圈排肥量台架试验与仿真试验相对误差为1.96%,台架试验与仿真试验吻合较好。在不同转速下同向双螺旋排肥器较单螺旋排肥器排肥均匀性波动系数平均降低64.21%、单圈排肥量平均提升72.16%,优化后的同向双螺旋排肥器排肥均匀性好且排肥流量大。

关键词 排肥器;单螺旋排肥器;同向双螺旋排肥器;均匀性;结构优化;离散元

中图分类号 S223.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)05-0278-10

螺旋输送机是一种将散体物料进行连续输送的设备,广泛应用于农业、矿产、化工等行业^[1-2],在农业中采用螺旋叶片结构的排肥器具有结构简单、输送量可调、价格低廉等优点^[3]。近年来国内外学者对提高传统单螺旋排肥器进行了大量研究。杨文武等^[4]研究了排肥口参数对单螺旋排肥器排肥性能的影响,得到排肥口长度和角度对排肥均匀性有显著影响;Marmur等^[5]研究不同螺距和物料尺寸对双螺旋输送机的性能影响,结果表明随着排肥器尺寸增大物料混合效率变低;宋欢^[6]基于EDEM仿真在入肥口处采用双线螺旋结构对螺旋输送机构进行了优化;顿国强等^[7]设计了一种采用肥料满充填螺旋挤压式输送原理的新型排肥器,通过试验分析得出排肥口长度、排肥口安装倾角对排肥均匀性波动系数影响显著。以上研究多为对单螺旋排肥器设计及改进研究,而未见基于新型排肥原理创新设计双螺旋排肥器的相关研究。

传统单螺旋排肥器的螺旋叶片终止端面在排肥口处不同位置时,螺旋叶片与壳体之间的储肥空间

不同,从而产生肥料颗粒周期性变化的脉动现象^[8]。本研究通过增加排肥轮的方式设计了一种同向双螺旋排肥器,分析排肥轮螺距、中心距、叶片高度对其排肥性能的影响,设计三因素三水平的Box-Behnken试验,结合离散元仿真对不同参数双螺旋排肥器的均匀性波动系数、肥料轴向平均速度进行分析和优化,并利用3D打印技术加工优化后的排肥器进行台架试验,以期提高同向双螺旋排肥均匀性和排肥能力,为同向双螺旋式排肥器的优化设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 整机结构与工作原理

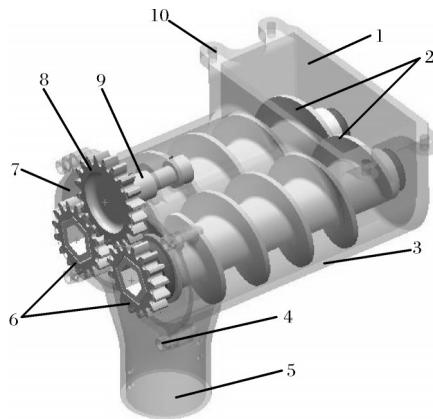
同向双螺旋式排肥器结构如图1所示,主要由右旋排肥轮、壳体、传动齿轮、端盖等组成,该排肥器的右旋排肥轮具有相同的结构及参数,呈倒8字形状壳体型腔内的两排肥轮的螺旋叶片成交叠状,依靠端部的大、小齿轮的啮合实现同向转动。排肥器配装在播种机或施肥机的肥箱下部,排肥器的排肥口通过排肥管与施肥开沟器链接,工作时,拖拉机悬挂牵

收稿日期:2023-03-23

基金项目:黑龙江省自然科学基金项目(LH2023E025);国家重点研发计划项目(2018YFD0201001);哈尔滨剑桥学院重点科研应用研究项目(JQZKY2022021)

顿国强,E-mail:dunguoqiangpaper@163.com

引机具前进进行施肥作业,机器的驱动六方轴穿过左侧排肥轮芯部的内六方孔,驱动左侧小齿轮带动左侧排肥轮转动,动力经由左侧小齿轮-大齿轮-右侧小齿轮之间的啮合传动,带动右侧排肥轮同向旋转,肥料通过排肥器的入肥口进入壳体后,被带有螺旋叶片的两排肥轮搅混后(进入壳体内的肥料颗粒在型腔内轴向移动的同时,沿着两排肥轮的周向运动,双排肥轮的搅浑排肥提升了排肥的均匀性),均匀横向输送到出肥口后,落入排肥管,由开沟器将肥料施入土壤。



1. 入肥口 Fertilizer inlet; 2. 右旋排肥轮 Right-handed fertilizer discharge wheel; 3. 壳体 Shell; 4. 螺栓 Bolt; 5. 排肥口 Fertilizer discharge; 6. 小齿轮 Gear; 7. 端盖 End cap; 8. 大齿轮 Large gear; 9. 齿轮轴 Gear shaft; 10. 安装孔 Mounting hole.

图1 同向双螺旋排肥器示意图
Fig.1 Schematic diagram of the co-rotating double-screw fertilizer discharge device

1.2 排肥性能分析

1)理论排肥量分析。同向双螺旋排肥器的理论排肥量主要由被输送肥料的有效横截面积和轴向输送速度所决定,双螺旋内腔截面如图2所示,其壳体周向截面积可以根据公式(1)~(2)计算。

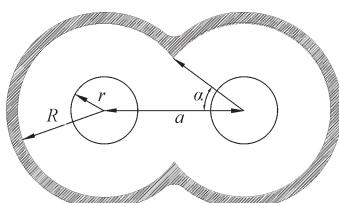


图2 同向双螺旋排肥器壳体截面示意图

Fig.2 Schematic diagram of shell section of the co-rotating double-screw fertilizer discharge device

$$\alpha = \arccos \frac{a}{2R} \quad (1)$$

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

式(1)~(2)中: S_{case} 表示壳体周向截面积, mm^2 ; R 为螺旋叶片外径, mm ; r 为螺旋叶片内径, mm ; α 为1/2重合区夹角,(°); a 为中心距, mm 。

同向双螺旋排肥器是水平螺旋输送,在研究同向双螺旋水平输送理论排肥量时,应该把肥料输送流量和肥料颗粒的轴向速度结合起来得到公式(3)。

$$Q = 3.6\rho\varphi CV_z S_{\text{case}} \quad (3)$$

式(3)中: Q 表示肥料输送流量, g/s ; V_z 表示肥料轴向速度, mm/s ; S_{case} 表示壳体周向截面积, mm^2 ; ρ 为肥料堆积密度, g/mm^3 ; φ 为肥料填充系数,0.7^[9]; C 为切斜修正系数(水平螺旋输送倾斜角为0°,则 $C=1$)。

2)排肥均匀性分析。排肥器壳体体积 V_{case} 主要由壳体周向截面积 S_{case} 和螺距 S 所决定,其可由公式(4)计算。

$$V_{\text{case}} = S \cdot S_{\text{case}} \quad (4)$$

式(4)中: V_{case} 表示排肥器壳体体积, mm^3 ; S_{case} 为壳体周向截面积, mm^2 ; S 为螺距, mm 。

计算螺旋叶片体积 V_{blade} ,首先将沿螺旋线旋转的螺旋叶片按照图3所示展开,螺旋叶片圆胚展开角可由公式(5)~(7)计算。

$$\begin{cases} L = \sqrt{(2\pi R)^2 + S^2} \\ l = \sqrt{(2\pi r)^2 + S^2} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} R_1 = \frac{(R-r)L}{L-l} \\ r_1 = \frac{(R-r)l}{L-l} \end{cases} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{(2\pi R_1 - L)360}{2\pi R_1} \quad (7)$$

式(5)~(7)中: L 为圆坯大径弧长, mm ; l 为圆坯小径弧长, mm ; S 为螺距, mm ; R_1 为螺旋叶片下料外径, mm ; r_1 为螺旋叶片下料内径, mm ; β 为圆坯展开缺角,(°)。如图3所示,其叶片体积可以简化为黑色区域绕螺旋轴转1圈所形成的体积 V_a 。

$$V_a = \pi (2rR_p + R_p^2)b \quad (8)$$

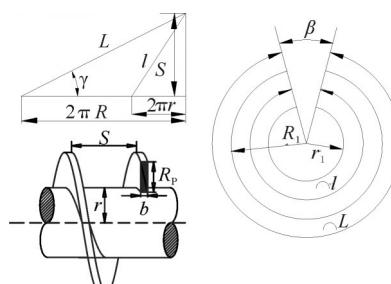


图3 螺旋叶片展开图
Fig.3 Expanded view of spiral blade

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

式(8)~(9)中: V_{blade} 表示螺旋叶片旋转1周体积, mm^3 ; V_a 表示黑色区域旋转1周体积, mm^3 ; R_p 为叶片高度, mm ; b 为螺旋叶片厚度, mm 。

通过以上分析可得排肥器单圈有效储肥体积 V_{valid} 如式(10), 同向双螺旋排肥器周向截面如图4所示。

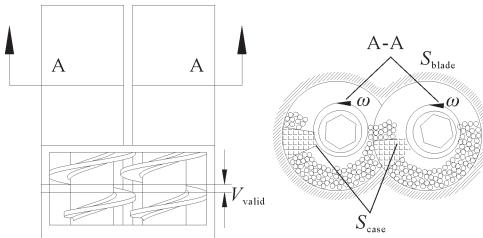


图4 同向双螺旋周向截面简化图

Fig.4 Simplified diagram of the circumferential section of the co-rotating double-screw fertilizer apparatus

$$V_{\text{valid}} = V_{\text{case}} - V_{\text{blade}} \quad (10)$$

式(10)中; V_{valid} 表示排肥器单圈有效储肥体积, mm^3 ; V_{case} 表示排肥器壳体体积, mm^3 ; V_{blade} 表示螺旋叶片旋转1周体积, mm^3 。

由于肥料颗粒在排肥器中并非满充填状态^[10], 因此螺旋叶片处在不同位置时单圈有效储肥体积 V_{valid} 会产生波动, 单圈有效储肥体积 V_{valid} 的变化幅度决定了排肥是否均匀。当螺旋叶片大、小径 R 、 r , 螺旋叶片厚度 b , 排肥器转速 ω 为定值时, 通过增大排肥器壳体体积 V_{case} 与减小螺旋叶片体积 V_{blade} 实现降低单圈有效储肥体积 V_{valid} 的波动。通过公式(4)和(9)可知, 排肥器壳体体积 V_{case} 和旋叶片体积 V_{blade} 仅与中心距 a 、螺距 S 、叶片高度 R_p 有关。

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 满足公式(11), 即中心距 $48 \text{ mm} \leqslant a \leqslant 56 \text{ mm}$ 。

$$R + \frac{r}{2} \leqslant a \leqslant 2R \quad (11)$$

通过查阅文献^[11-12]可知, 螺距 S 优化区间介于 $(0.5 \sim 0.7)D$, D 为螺旋叶片外径, 参照国标 GB/T 35487—2017《变量施肥播种机控制系统》所规定的排肥量 $400 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 确定本研究螺旋叶片外径 D 为 50 mm 。螺距 S 过小排肥器单圈排肥量变小则需提高排肥器转速 ω 增加排肥量, 排肥器转速 ω 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 $28 \text{ mm} \leqslant S \leqslant 34 \text{ mm}$ 。

由式(8)~(9)得: 叶片高度 $10 \text{ mm} \leqslant R_p \leqslant 18 \text{ mm}$

mm。因此, 设定叶片高度 R_p 的试验优化区间为 $10 \text{ mm} \leqslant R_p \leqslant 18 \text{ mm}$ 。

3)肥料运动学分析。肥料在同向双螺旋排肥器中输送时, 受到螺旋叶片所产生的力的作用下, 其运动方式主要包括一种向排肥器出口运动的轴向运动和沿着轴方向旋转的周向运动。由于在实际的输送过程中肥料运动复杂, 为了简化模型做以下假设, 将单颗肥料看做质点, 不考虑肥料与肥料之间的相对滑动。选取螺旋叶片上距离螺旋轴为 h 的单颗肥料 A 作为研究对象, 将单颗肥料 A 看做质点 M , 运动分解图如5所示。

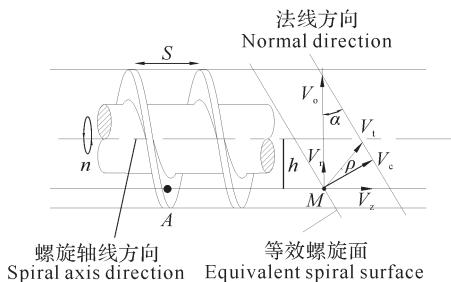


图5 肥料的运动速度分解图

Fig.5 The decomposition diagram of the movement speed of fertilizer

若螺旋轴以一定速度 n 旋转, 则肥料颗粒沿着 M 点的切线方向是线速度方向 V_o , 即为肥料颗粒的牵引速度; 如果在不考虑螺旋叶片摩擦力的作用下肥料颗粒向着螺旋叶片的法线方向做绝对速度 V_t 运动; 但是由于肥料与螺旋叶片接触时产生切方向的摩擦力 f_t , 使绝对速度 V_t 发生一个角度偏转得到速度 V_c , 这个角度偏转记做螺旋叶片与肥料的外摩擦当量角 ρ ; 速度 V_c 可以分解为周向速度 V_r 和轴向速度 V_z , 肥料颗粒的运动速度可运用速度三角形方法来求解, 首先由图5得:

$$\begin{cases} V_z = V_c \cos(\alpha + \rho) \\ V_r = V_c \sin(\alpha + \rho) \end{cases} \quad (12)$$

$$V_c = \frac{nS}{60 \tan \alpha} \frac{\sin \alpha}{\cos \rho} = \frac{nS \cos \alpha}{60 \cos \rho} \quad (13)$$

将式(13)代入(12), 整理可得:

$$\begin{cases} V_z = \frac{nS}{60} (\cos^2 \alpha - \cos \alpha \sin \alpha \tan \rho) \\ V_r = \frac{nS}{60} (\cos \alpha \sin \alpha + \cos^2 \alpha \tan \rho) \end{cases} \quad (14)$$

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{S}{2\pi R})^2}} \quad \sin \alpha = \frac{\frac{S}{2\pi R}}{\sqrt{1 + (\frac{S}{2\pi R})^2}} \quad (15)$$

将式(15)代入(14), 整理可得:

$$V_z = \frac{nS}{60} \frac{1 - \mu_1 \frac{S}{2\pi R}}{1 + \left(\frac{S}{2\pi R}\right)^2} \quad (16)$$

$$V_r = \frac{nS}{60} \frac{\mu_1 + \frac{S}{2\pi R}}{1 + \left(\frac{S}{2\pi R}\right)^2} \quad (17)$$

式(12)~(17)中: V_z 表示肥料轴向速度, mm/s; V_r 表示肥料周向速度, mm/s; μ_1 为肥料与旋转面间的摩擦系数; n 为螺旋轴的转速, r/min; S 为螺旋叶片螺距, mm; R 为肥料颗粒 A 所在位置的半径, mm。

由公式(16)~(17)可知, 在排肥器转速 n 、螺距 S 及外摩擦系数 μ_1 确定的情况下, 肥料的轴向速度 V_z 和周向速度 V_r 与肥料颗粒所在位置的半径相关, 叶片高度 R_p 和中心距 a 决定双排肥轮啮合区域大小, 在同向双螺旋中处于双排肥轮啮合区域的肥料颗粒受到 2 个轴向速度 V_z , 因此在啮合区域的肥料颗粒越多排肥器整体肥料轴向速度越大, 肥料轴向速度越大排肥器单圈排肥量越多。

1.3 排肥性能仿真与优化

1) 仿真参数设定。本研究使用的肥料为史丹利氮肥(实测百粒平均直径 2.22 mm、标准差 0.22 mm, 颗粒建模采用纯球体), 排肥器材料为 PLA 塑料, 肥料颗粒为干燥无结块颗粒, 则肥料颗粒与肥料颗粒, 肥料颗粒与排肥轮、壳体之间均采用 Hertz-mindlin (no-slip) 模型, 查阅相关文献^[13-14], 仿真模型的相关参数设定见表 1。

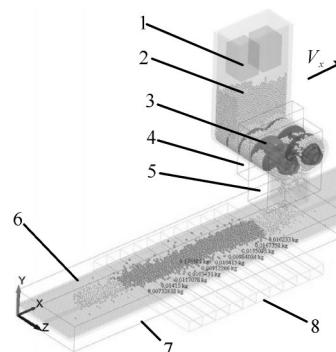
2) 仿真模型建立。利用 SolidWorks 2020 对不同参数的排肥器进行建模, 并对不必要的结构进行简化处理, 将 SolidWorks 中的模型转换成 IGS 文件导入 EDEM 中, 依表 1 设置各项参数, 在肥箱中建立颗粒工厂, 设置生成速率 15 000 颗/s, 共生成 25 000 颗肥料颗粒, 所有肥料颗粒生成后排肥器开始转动。因排肥器每个排肥循环周期肥料具有相同的运动规律, 为便于参数设置及仿真监测区数据的提取, 并与后文的单螺旋排肥器对比分析, 因此排肥轮转速设置 60 r/min。因采用网格法对排肥均匀性进行数据统计, 将单个循环周期排肥器行进距离(排肥施长度)均分为 10 份, 后期验证采用宽度为 20 mm 的集肥盒, 及集肥盒区间宽度为 200 mm 等于排肥器为 1 个/s 循环周期撒施长度, 因此, 在仿真试验中排肥器移动速度 0.2 m/s, 此速度只为研究排肥器排肥均匀性,

表 1 全局变量参数设置

Table 1 Global variable parameter setting

项目 Item	属性 Property	值 Value
肥料颗粒 Fertilizer particles	泊松比 Poisson ratio	0.25
	剪切模量/Pa Shear modulus	3.4×10^7
	密度/(kg/m ³) Density	1 283
排肥轮、壳体 Discharging wheel, shell	泊松比 Poisson ratio	0.394
	剪切模量/Pa Shear modulus	3.18×10^8
	密度/(kg/m ³) Density	1 240
颗粒-颗粒 Particle to particle	恢复系数 Recovery factor	0.28
	静摩擦因素 Static friction coefficient	0.36
	滚动摩擦因素 Rolling friction coefficient	0.15
颗粒-排肥轮、壳体 Particle to discharging wheel and shell	恢复系数 Recovery factor	0.35
	静摩擦因素 Static friction coefficient	0.41
	滚动摩擦因素 Rolling friction coefficient	0.04

不作为田间试验机具作业速度。仿真步长 9.25×10^{-6} s, 数据记录间隔 0.01 s。同向双螺旋式排肥器 EDEM 仿真模型如图 6 所示。



V_x 为排肥器的运动方向 V_x is the moving direction of screw extrusion precision fertilizer ejector. 1. 颗粒工厂 Pellet plant; 2. 肥料 Fertilizer; 3. 同向双螺旋排肥器 Co-rotating double-screw fertilizer discharge device; 4. 轴向速度监测区 Axial velocity monitoring zone; 5. 截面监测区 Cross-section monitoring zone; 6. 集肥板 Fertilizer collection plate; 7. 总质量监测区 Total mass monitoring zone; 8. 网格监测区 Grid monitoring zone.

图 6 EDEM 仿真图

Fig.6 EDEM simulation diagram

如图 6 所示, 在 EDEM 后处理中在集肥板上建立总质量检测区。如图 7 所示, 提取排肥器的时间累

积排肥质量数据，并对稳定排肥段3.5~6.5 s的累积排肥质量进行数据拟合，累积排肥质量与时间呈线性正相关，相关系数 $R^2=0.99$ ，表明排肥器的排肥质量随着时间稳定均匀增大，排肥流量均匀。同时，为观察排肥器不同时刻工作状态，在排肥器出肥口处建立截面监测区，提取不同时刻肥料颗粒空间分布如图7所示，可以看出在排肥3.5 s时右边排肥轮流量明显大于左边排肥轮，在排肥4 s时左边排肥轮流量明显大于右边排肥轮，排肥器采用左、右排肥轮交替工作来实现出肥口的连续排肥，相较单螺旋排肥器在结构设计上提升了排肥均匀性。最后，为获得排肥器的田间撒肥质量，以评价排肥器的排肥流量均匀性，在集肥板上稳定排肥段建立网格监测区。

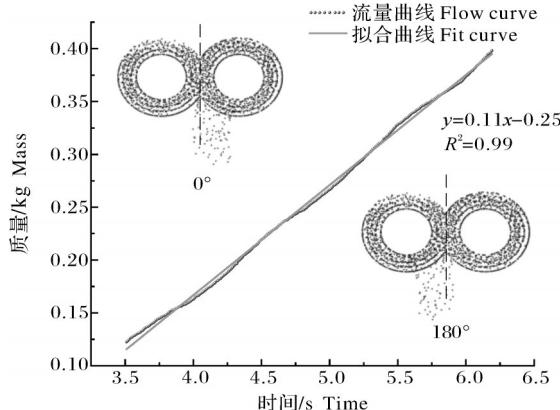


图7 排肥过程分析图

Fig.7 Fertilization process analysis diagram

3) 仿真试验指标。为了准确评价离散元仿真中排肥器不同结构参数对排肥性能的影响，采用网格法^[15-16]对排肥均匀性进行数据统计，将单个循环周期排肥器行进距离(排肥撒施长度)均分为10份，对监测区不同时间下的肥料数量进行统计，通过公式(18)~(19)得出均匀性波动系数 σ_u ，肥料均匀性波动系数越小代表排肥越均匀。

$$m_a = \frac{\sum_{i=1}^{10} m_i}{n} \quad (i=1, 2, \dots, 10) \quad (18)$$

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (m_i - m_a)^2}{m_a^2(n-1)}} \times 100\% \quad (i=1, 2, \dots, 10) \quad (19)$$

式(18)~(19)中： m_i 为第*i*个网格内肥料颗粒的质量，g； n 为监测区均分网格单元的数量， $n=10$ ； m_a 为网格单元内肥料颗粒平均质量，g； σ_u 为单循环周期的均匀性波动系数，%。

如图6中轴向速度监测区测量单个排肥周期内的肥料轴向输送速度，通过公式(20)得出肥料轴向

平均速度，肥料轴向平均速度越快代表排肥器输送肥料能力越强。

$$V_{\text{average}} = \frac{V_{\text{total}}}{N} \quad (20)$$

式(20)中： V_{total} 表示肥料轴向总速度，mm/s； N 为肥料的总颗数，颗； V_{average} 表示肥料轴向平均速度，mm/s。

2 结果与分析

2.1 仿真试验结果

为确定叶片高度对排肥均匀性和肥料轴向平均速度的影响，利用离散元仿真技术对不同高度的叶片进行单因素试验研究。试验的排肥器螺距为31 mm(等于排肥轮直径)，为了确保螺旋叶片之间转动时不发生碰撞且降低中心距对试验的影响，固定中心距为优化范围中间值为52 mm，由理论分析设定叶片高度 R_p 的单因素试验优化区间为 $10 \text{ mm} \leq R_p \leq 18 \text{ mm}$ 。试验结果表明，随着叶片高度的增加，排肥均匀波动系数先降低后增大，在14 mm附近取得最小值，肥料的轴向平均速度先增大后减小，在15 mm处取得最大值(图8)。因此，在排肥均匀波动系数最小且肥料轴向平均速度相对最大时，取叶片高度范围为12~16 mm。

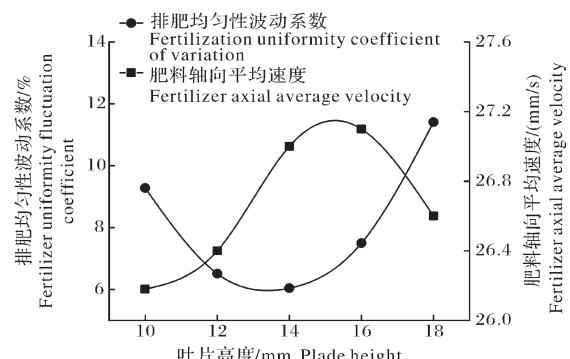


图8 叶片高度单因素试验图

Fig.8 Single factor test diagram of blade height

中心距、螺距、叶片高度是影响排肥器排肥性能的重要参数，对排肥器均匀性起着决定性作用。试验选取中心距、螺距、叶片高度为试验因素，采用三因素三水平Box-Behnken试验方法，试验因素水平表如表2所示。应用Design-Expert8.0.6软件进行数据处理和统计分析。

试验结果如表3所示，表3中 x_1 、 x_2 、 x_3 表示因素编码值。排肥均匀性波动系数模型的方差分析如表4所示。模型的显著性检验 $F=21.16$, $P<0.01$ ，回归模型极显著，失拟项检验结果为不显著($P>0.05$)，

表2 Box-Behnken试验因素水平

Table 2 Test factor level

水平 Level	中心距 a /mm Center distance	螺距 S /mm Pitch	叶片高度 R_p /mm Blade height
1	48	28	12
0	52	31	14
-1	56	34	16

表3 Box-Behnken试验结果

Table 3 Test result of Box-Behnken

编号 No.	x_1 中心 距 a Center distance	x_2 螺距 S Pitch	x_3 叶片高 度 R_p Blade height	y_1 排肥均匀性 波动系数/% Fluctuation coefficient of uniformity of fertilizer discharge	y_2 肥料轴向平 均速度/ (mm/s) Axial average speed of fertilizer
1	-1	-1	0	19.34	24.14
2	1	-1	0	28.34	26.58
3	-1	1	0	18.31	30.12
4	1	1	0	19.77	29.71
5	-1	0	-1	18.06	26.84
6	1	0	-1	32.42	26.93
7	-1	0	1	19.22	24.62
8	1	0	1	15.59	27.15
9	0	-1	-1	35.04	24.91
10	0	1	-1	25.33	31.12
11	0	-1	1	32.83	24.56
12	0	1	1	20.54	29.61
13	0	0	0	11.48	29.38
14	0	0	0	10.41	29.11
15	0	0	0	9.85	28.96
16	0	0	0	9.30	29.35
17	0	0	0	6.28	29.38

表明回归模型在试验范围拟合程度较好。对于排肥均匀性波动系数模型, x_2 、 x_1x_3 、 x_2^2 、 x_3^2 对方程影响为极显著($P<0.01$), x_1 、 x_3 对方程影响为显著($0.01<P<0.05$), 其余项对方程无影响($P>0.05$), 剔除回归方程中系数影响不显著因素。各因素与排肥均匀性波动系数的回归方程为:

$$y_1 = 1128.95 + 8.53x_1 - 67.96x_2 - 39.1x_3 - 0.56x_1x_3 + 1.07x_2^2 + 2.38x_3^2 \quad (21)$$

肥料轴向平均速度的方差分析如表5所示。模型的显著性检验 $F=79.72$, $P<0.01$, 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。对于肥料轴向平均速度模型, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_1x_2 、 x_1x_3 、 x_1^2 、 x_3^2 对方程影响为极显著($P<0.01$), 其余项对方程无影响($P>0.05$)。各因素与肥料轴向平均速度的回归方

表4 排肥均匀性波动系数方差分析

Table 4 Variance analysis of fluctuation coefficient of fertilizer uniformity

方差来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 DF	均方 Mean square	F值 F value	P值 P value
模型 Model	1 193.76	9	132.64	21.16	0.000 3
x_1	56.11	1	56.11	8.95	0.020 2
x_2	124.82	1	124.82	19.91	0.002 9
x_3	64.26	1	64.26	10.25	0.015 0
x_1x_2	14.17	1	14.17	2.26	0.176 5
x_1x_3	80.87	1	80.87	12.90	0.008 8
x_2x_3	1.66	1	1.66	0.26	0.622 7
x_1^2	24.96	1	24.96	3.98	0.086 2
x_2^2	383.72	1	383.72	61.20	0.000 1
x_3^2	374.48	1	374.48	59.73	0.000 1
残差 Residual	43.89	7	6.27		
失拟项 Lack of fit	28.6	3	9.53	2.49	0.199 1
纯误差 Pure error	15.29	4	3.82		
总变异 Cor total	1 237.65	16			

表5 肥料轴向平均速度方差分析

Table 5 Analysis of variance for the average axial velocity of fertilizers

方差来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 DF	均方 Mean square	F值 F value	P值 P value
模型 Model	78.96	9	8.77	79.72	<0.000 1
x_1	2.70	1	2.70	24.56	0.001 6
x_2	51.86	1	51.86	471.33	<0.000 1
x_3	1.86	1	1.86	16.92	0.004 5
x_1x_2	2.03	1	2.03	18.45	0.003 6
x_1x_3	1.48	1	1.48	13.52	0.007 9
x_2x_3	0.33	1	0.33	3.05	0.123 9
x_1^2	8.03	1	8.03	73.05	<0.000 1
x_2^2	0.19	1	0.19	1.79	0.221 9
x_3^2	9.08	1	9.08	82.59	<0.000 1
残差 Residual	0.77	7	0.11		
失拟项 Lack of fit	0.62	3	0.21	5.86	0.0634
纯误差 Pure error	0.15	4	0.037		
总变异 Cor total	79.73	16			

程为:

$$y_2 = -349.54 + 9.97x_1 + 3.93x_2 + 6.15x_3 - 0.05x_1x_2 + 0.07x_1x_3 - 0.08x_1^2 - 0.37x_3^2 \quad (22)$$

由图9A可知, 当叶片高度位于低水平时, 随着中心距的增大排肥均匀性波动系数剧增, 当叶片高

度位于高水平时,随着中心距的增大排肥均匀性波动系数略降;不论叶片高度的水平高低,随着叶片高度的增大排肥均匀性波动系数先略降后增大。中心距和叶片高度决定着排肥轮的啮合程度,啮合越好排肥轮交替排肥越明显且排肥均匀性越好。由图9B可知,随着螺距的增大肥料轴向平均速度增大,随着中心距的增大肥料轴向平均速度先缓增后微降,肥

料轴向平均速度越大单圈下输送肥料的距离越远,因此肥料轴向平均速度越快。由图9C可知,随着叶片高度的增大,肥料轴向平均速度先缓增后剧降,随着中心距的增大肥料轴向平均速度先增大后微降,中心距和叶片高度决定着排肥轮的啮合区域的大小,由公式(16)可以得到处于啮合区域的肥料颗粒越多,肥料轴向平均速度越大。

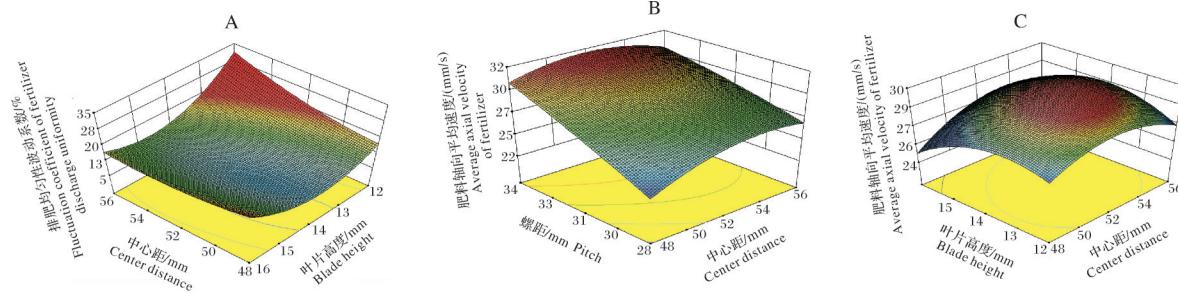


图9 响应曲面图

Fig.9 Response surface diagram

由图9A可知,中心距在48 mm时排肥均匀性波动系数低且中心距越小排肥器制造成本越低。因此,将中心距设定为48 mm,排肥均匀性波动系数越小,排肥越均匀,因此,设定排肥均匀性波动系数 $\leq 10\%$,肥料轴向平均速度越大,同转速下输送肥料的能力越强,因此设定肥料轴向平均速度 $\geq 30 \text{ mm/s}$,利用Design-Expert8.0.6多目标优化方法,得到优化方程如式(23)。

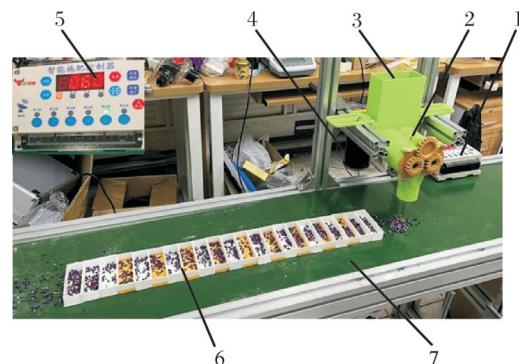
$$\begin{cases} x_1 = 48 \\ 28 \leq x_2 \leq 34 \\ 12 \leq x_3 \leq 16 \\ y_1 = f(x_1, x_2, x_3) \\ y_2 = f(x_1, x_2, x_3) \\ y_1 \leq 10 \\ y_2 \geq 30 \end{cases} \quad (23)$$

基于式(23),得到优化区间分别为螺距32.5~33.2 mm、叶片高度13.5~14.7 mm。在优化区间中选取螺距32 mm,叶片高度14 mm进行仿真实验验证,试验结果显示,肥料均匀性波动系数为8.29%,肥料轴向平均速度为30.03 mm/s,达到优化目标,验证了试验优化结果的正确性。

2.2 排肥性能台架试验结果

螺距越大排肥器输送能力越强,叶片高度越大单圈排肥量越多,结合生产成本和加工制造难度,选取中心距为48 mm、螺距33 mm、叶片高度14 mm。为验证同向双螺旋排肥器的最优结构参数的正确

性,选用史丹利氮肥颗粒,对同向双螺旋排肥器进行台架试验验证(图10)。试验开始时将电机转速设置为60 r/min,集肥盒距出肥口下方80 mm情况下,待排肥稳定后,启动并设定传送带速度为0.2 m/s,单次测量2个排肥周期,采用日本GX-8K电子秤测量集肥盒里肥料质量,为了进一步研究同向双螺旋排肥器的排肥性能,在转速30~120 r/min范围内,梯度为30 r/min进行全转速排肥性能测试,单次试验重复5次取平均值。



1. 电机控制器 Motor controller; 2. 同向双螺旋排肥器 Co-rotating double-spiral fertilizer discharge device; 3. 肥箱 Fertilizer box; 4. 驱动电机 Drive motor; 5. 控制器 Controller; 6. 集肥盒 Fertilizer collection box; 7. 传送带 Conveyor belt.

图10 排肥性能台架试验

Fig.10 Bench test of fertilizer apparatus performance

采用网格法对排肥均匀性进行数据收集,台架试验中单个网格用宽20 mm的集肥盒替代,通过公

式(18)~(19)得出排肥均匀性波动系数。由于台架试验中肥料轴向平均速度无法直接测量,因此,采用直接统计单圈排肥量即集肥盒内肥料颗粒的总质量进行间接测量。

为验证优化分析结果的准确性,以史丹利氮肥为试验肥料进行台架验证试验。对比表6中台架试

验数据与仿真数据,台架试验的排肥均匀性波动系数与仿真试验的相对误差为1.47%,单圈排肥量相对误差为1.96%,验证试验与仿真试验基本吻合,通过对比试验数据,不同转速下同向双螺旋排肥均匀性变异系数较单螺旋排肥器平均降低64.21%,不同转速下单圈排肥量平均提升72.16%。

表6 验证试验与对比试验结果

Table 6 Results of verification test

转速/(r/min) Speed	前进速度/(m/s) Forward speed	排肥器类型 Fertilizer ejector type	试验方式 Test method	排肥均匀性波动系数/% CV of fertilizer discharge uniformity	单圈排肥量/g Single circle fertilizer discharge
30	0.1	A	F	9.23	79.39
			T	9.39	77.45
	0.2	B	T	48.29	39.21
		A	F	9.05	78.89
60	0.2	B	T	8.84	77.12
			F	42.56	38.95
	0.3	A	F	8.68	79.24
			T	8.93	78.51
90	0.3	B	T	36.17	39.16
			F	8.61	78.93
	0.4	A	T	8.94	77.28
			F	36.76	39.54

注 Note: A: 同向双螺旋排肥器 Co-rotating double-spiral fertilizer discharge device; B: 单螺旋排肥器 Single screw fertilizer discharge device; F: 仿真试验 Simulation test; T: 台架试验 Bench test.

3 讨 论

本研究针对单螺旋排肥器在螺旋叶片终止端面与壳体之间的储肥空间不同所产生排肥不均匀问题,研究设计了一种双排肥轮结构的螺旋排肥器,然后进行三因素三水平Box-Behnken仿真试验。根据所建立的排肥均匀性波动系数、轴向平均速度回归模型并利用Design-Expert 8.0.6软件得出试验因素对试验指标影响的变化关系,排肥轮螺距对排肥均匀性波动系数影响极显著($P<0.01$),排肥轮中心距、叶片高度对排肥均匀性波动系数影响显著($0.01 < P < 0.05$),排肥轮螺距、中心距、叶片高度对轴向平均速度影响极显著($P<0.01$),并在排肥均匀性波动系数 $\leq 10\%$ 、肥料轴向平均速度 $\geq 30 \text{ mm/s}$ 下优化得到排肥器的最佳参数为:中心距为48 mm、螺距33 mm、叶片高度14 mm。为验证优化分析结果的准确性,以史丹利氮肥为试验肥料进行台架验证试验。试验结果表明:台架试验的排肥均匀性波动系数与仿真试验的相对误差为1.47%,单圈排肥量相对误差为1.96%,验证试验与仿真试验基本吻合,优化后同向双螺旋排肥器较单螺旋排肥器均匀性变

异系数平均降低64.21%、单圈排肥量平均提升72.16%。优化后的同向双螺旋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,30~120 r/min转速范围内排肥性能稳定证明排肥器具有实用性。

参考文献 References

- [1] 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 J T, MENG H W, KAN Z, et al. Analysis and test of feeding performance of dual-spiral cow feeding device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 65-71 (in Chinese with English abstract).
- [2] 陈汝超,陈晓平,蔡佳莹,等.粒煤螺旋输送特性实验研究[J].煤炭学报,2012,37(1):154-157.CHEN R C, CHEN X P, CAI J Y, et al. Screw conveying characteristics of granular coal from screw conveyor[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 154-157 (in Chinese with English abstract).
- [3] 吴超,吴努,胡志超.基于DEM的螺旋输送机模拟仿真[J].中国农机化学报,2015,36(2):92-94.WU C, WU N, HU Z C. Simulation of the screw conveyor based on the DEM [J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2015, 36 (2): 92-94 (in Chinese with English abstract).

- [4] 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 W W, FANG L Y, LUO X W, 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 with English abstract).
- [5] MARMUR B L, HEINDEL T J. Scale effects on double-screw granular mixing [J]. Powder technology, 2017, 321: 74-88.
- [6] 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 H.Optimization design and simulation of quantitative screw conveyor[D].Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [7] 顿国强,刘文辉,吴星澎,等.螺旋挤压式精量排肥器的仿真优化及试验[J].吉林大学学报(工学版),2023,53(10) : 3026-3037.DUN G Q, LIU W H, WU X P, et al. Simulation optimization and experiment of screw extrusion precision fertilizer ejector[J].Journal of Jilin University(engineering and technology edition) , 2023, 53 (10) : 3026-3037 (in Chinese with English abstract).
- [8] 刘洪男,李陶,赵何跃,等.气送式集中排肥器螺旋排肥装置的改进与试验[J].中国农业大学学报,2021,26(8):150-161.
LIU H N, LI T, ZHAO H Y, et al.Design and experiment of screw-type feeding device of air-assisted centralized fertilizer application device[J].Journal of China Agricultural University, 2021,26(8):150-161(in Chinese with English abstract).
- [9] 机械设计选用手册编委会.机械工程师手册[K].北京:机械工业出版社,2000.Editorial Committee for Mechanical Design Selection Manual.Mechanical engineer handbook[K].Beijing: Machinery Industry Press,2000(in Chinese).
- [10] 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.
- [11] 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 X F, LUO X W, WANG Z M, 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 with English abstract).
- [12] YU Y W, SAXÉN H. Experimental and DEM study of segregation of ternary size particles in a blast furnace top bunker model[J].Chemical engineering science, 2010, 65(18) : 5237-5250.
- [13] 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 Z, ZHU Q C, SUN J F, 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 with English abstract).
- [14] 汪小旵,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(S2):88-92.WANG X C, CHEN M, SUN G X, et al.Design and test of control system on variable fertilizer applicator for winter wheat[J].Transactions of the CSAE, 2015, 31 (S2) : 88-92 (in Chinese with English abstract).
- [15] 韩丹丹,何彬,周毅,等.气吸式密植精量排种器的设计与试
验[J].华中农业大学学报,2023,42(1):237-247.HAN D D, HE B, ZHOU Y, et al. Design and experiment of air suction type dense planting precision seed metering device[J].Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42 (1) : 237-247 (in Chinese with English abstract).
- [16] 杨立伟,陈龙胜,张俊逸,等.离心圆盘式撒肥机撒肥均匀性
试验[J].农业机械学报,2019,50(S1) : 108-114.YANG L W, CHEN L S, ZHANG J Y, et al. Fertilizer uniformity test of centrifugal disc fertilizer spreader [J]. Transactions of the CSAM, 2019, 50 (S1) : 108-114 (in Chinese with English abstract).
- [17] 罗锡文,廖娟,胡炼,等.提高农业机械化水平促进农业可持
续发展[J].农业工程学报,2016,32(1):1-11.LUO X W, LI-
AO J, HU L, et al. Improving agricultural mechanization lev-
el to promote agricultural sustainable development [J]. Transac-
tions of the CSAE, 2016, 32(1) : 1-11 (in Chinese with Eng-
lish abstract).

Optimization and experiment of co-rotating and double-spiral fertilizer feeder

DUN Guoqiang^{1,2}, LI Xin², JI Xinxin², SHENG Quanbao², JI Wenyi³

1. *Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery Equipment Engineering,
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*

Abstract A co-rotating and double-spiral fertilizer feeder with a double distributing wheel was designed to solve the problem of uneven fertilization, resulting in low utilization efficiency of fertilizer in traditional fertilizer feeder. The theoretical discharge capacity of fertilizer and the parameters affecting the uniformity of fertilizer were determined through theoretical analyses. A Box-Behnken experiment with three-factor and three-level was conducted using the pitch, center distance, and blade height of the fertilizer distributing wheel as experimental factors, and the fluctuation coefficient of fertilizer uniformity and average axial speed as experimental indexes. The results showed that the effect of pitch on the fluctuation coefficient of fertilizer uniformity was extremely significant ($P<0.01$), while the effect of center distance and blade height on the fluctuation coefficient of fertilizer uniformity was significant ($0.01<P<0.05$). The effect of pitch, center distance, and blade height on the average axial speed was extremely significant. When the center distance, the pitch and the blade height of the fertilizer distributing wheel was 48 mm, 32.5-33.2 mm and 13.5-14.7 mm, the fluctuation coefficient of fertilizer uniformity was $\leqslant 10\%$, and the axial speed of the fertilizer was ≥ 30 mm/s, the optimal performance of the fertilizer feeder was achieved. Under the optimized parameter combination, the relative error between the fluctuation coefficient of fertilizer uniformity in the bench experiment and simulation experiment was 1.47%, and the relative error between the volume of fertilizer distributed in a single lap in the bench experiment and simulation experiment was 1.96%, indicating that the bench experiment and simulation experiment are in good agreement. At different speeds, the fluctuation coefficient of fertilizer uniformity in the co-rotating and double-spiral fertilizer feeder was reduced by an average of 64.21% and the average fertilizer volume distributed in a single turn was increased by 72.16% compared to the single-spiral fertilizer feeder, indicating that the optimized the co-rotating and double-spiral fertilizer feeder has good fertilizer uniformity and a large flow rate of fertilizer. It will provide a useful guide for designing a co-rotating double-spiral fertilizer feeder.

Keywords fertilizer feeder; single-spiral fertilizer feeder; co-rotating double-spiral fertilizer discharge device; uniformity; structure optimization; discrete element method

(责任编辑:陆文昌)