· · ·

DOI: 10.13718/j. cnki. xdzk. 2019.04.011

基于离散单元法的荞麦播种机排种器设计与试验®

李明生, 叶进, 李登,

杨 仕, 曾百功, 柳 剑

西南大学 工程技术学院,重庆 400715

摘要:为优化荞麦播种机外槽轮式排种器的最佳排种性能参数,满足3种典型荞麦种子的农艺要求,降低田间试 验强度,采用球颗粒聚合法建立3种典型荞麦种子的 EDEM 仿真分析模型,通过试验测量计算3种荞麦种子在不 同接触形式下的刚度系数和阻尼系数,基于离散单元法对荞麦播种机排种器进行数值模拟.采用 $L_4(2^3)$ 正交试验 法进行排种器工作过程模拟,研究不同转速、凹槽半径和槽数对排种器排量的影响. 仿真试验结果表明:凹槽半径 为 3×10^{-3} m,槽数为 20,槽轮转速为 58.58 r/min 时,排种器能够满足 3 种荞麦种子的最大播量要求. 台架试验 结果表明:台架试验与仿真试验的排量相对误差 2.93%~9.90%;荞麦排种器的排量随槽轮转速的增加而增加, 总体线性度相关系数 $R^2 > 0.98$.

关键 词:荞麦;排种器;离散单元法;正交试验;台架试验

中图分类号: S223.2⁺3 文献标志码: A 文章编号: 1673-9868(2019)04-0078-08

我国荞麦主要产区在西北、东北、华北以及西南一带高寒山区,常年种植面积超过 130 万 hm².目前 国内外荞麦机械化播种程度较低,荞麦播种机多为其他作物播种机的改装机,排种器并非针对荞麦种子设 计,因此播种质量不高.

荞麦种子属于散粒农业物料,其物理特性与玉米、大豆、小麦等差别较大,设计一种适用于荞麦播种 机的排种器,可以显著提高荞麦播种机械化水平,提升播种效率和精度.

在散粒农业物料排种器的设计过程中必须考虑其与散粒农业物料的相互作用及其动力学关系^[1].离散 单元法将介质视作一系列独立运动的刚性单元的集合,与物质本身性质一致,因此农业机械设计中得到了 广泛的应用^[2-3].

本文利用离散单元法设计一种外槽轮式荞麦播种机排种器并进行参数仿真优化,最后通过台架试验进 行验证.

1 结构和工作原理

设计荞麦播种机排种器为外槽轮式,如图1所示.排种器由排种轮、排种器盒体、种刷、排种轮挡 圈、挡圈压板、排种轴、落种管连接件和螺钉等组成.排种器工作时,排种轴带动排种轮旋转,种子在排 种器盒体内依靠自身重力充填进入排种轮的凹槽内,在凹槽的强制带动和摩擦力的作用下,跟随凹槽运

① 收稿日期: 2018-04-24

基金项目:重庆市社会事业与民生保障科技创新专项(cstc2017shms-xdny8003). 作者简介:李明生(1987-),讲师,博士,主要从事农业机械化及机电液一体化技术的研究. 通信作者:叶 进,教授.

动,实现排种.轴向移动排种轮,改变凹槽有效工作长度,可以改变播量;改变种刷与槽轮的间隙可以适应不同大小的种子.外槽轮式排种器排量稳定,其排量与凹槽有效工作长度成线性关系,可满足荞麦的各种播量要求.

2 仿真模型

2.1 排种器边界模型

2.1.1 边界模型建模方法

在利用离散单元法进行外槽轮式排种器工作过程 分析时,需要建立排种器的边界模型,目前常用的边 界模型建立方法有4种,分别是函数建模法、颗粒排 列法、有限壁法和 CAD 建模法^[4~6].排种器的边界模 型较复杂,适用 CAD 建模法,即利用 CAD 软件建立 边界模型后导入离散单元法计算分析软件,分析软件 通过读取图元信息,提取与颗粒有接触的图元进行边 界建模.



排种轮; 2. 排种轮挡圈; 3. 挡圈压板; 4. 排种器盒体;
5. 种刷; 6. 排种轴; 7. 落种管连接件.
图 1 荞麦排种器结构图

2.1.2 排种器外槽轮仿真边界模型

外槽轮式排种器的核心在于其排种外槽轮(简称槽

轮),当槽轮转速在一定范围内时,排种器的排量与槽轮有效工作长度成正比^[7].本文建立最大工作长度的 槽轮仿真模型,以检验其排量能否满足荞麦种子最大公顷播量要求.

外槽轮式排种器槽轮的主要参数包括槽轮直径 d、工作长度 L、转速 n、凹槽半径 r 和槽数 z. 根据 荞麦播种特点,确定荞麦播种器排种轮直径为 0.06 m; 农艺要求荞麦的播量为 59.7~74.6 kg/hm²,由 此确定播种器最大工作长度为 0.03 m; 根据排种器实际工作转速,选取播种器转速为 24.25 r/min 和 55.67 r/min 两档; 荞麦种子体积较小,因此槽轮槽型宜浅,初步选择凹槽的半径为 0.002 m 和 0.003 m 两种; 外槽轮的槽数一般为 8~20 槽,根据播种量初步确定槽数分别为 16 槽和 20 槽.由此得到槽轮主 要参数如表 1 所示.

表 1	外槽轮式排种器槽轮的王要参数	

d/m	L/m	$n/(r \cdot \min^{-1})$	$r/(10^{-3} \text{ m})$	z/\uparrow
0.06	0.03	24.25/55.67	2/3	16/20

根据凹槽半径和槽数的不同,搭配出4种槽轮模型.凹槽半径为0.003m、槽数为20的槽轮Solid-Works 三维模型如图2所示.通过更换槽轮,研究不同凹槽半径和槽数对排种器排种过程的影响.

2.2 荞麦种子颗粒模型及物理特性

在用离散单元法分析农业物料时,常对物料颗粒进行 简化,以减少时间成本,但由于模型与农业散粒物料特别是 外形较为复杂的散粒之间的形状差异较大,因此分析结果 存在着一定的不准确性^[8-10].为提高仿真分析的准确性,本 文采用球颗粒聚合法分别建立接近荞麦种子真实形状的甜 荞1号、甜荞2号和苦荞等3种典型品种荞麦种子的 EDEM颗粒模型,如图3所示.

农作物籽粒的三维尺寸是其最基本的物理特性参数, 它决定了荞麦播种机排种器中排种凹槽的尺寸.测定荞麦 籽粒三维尺寸、等效直径、球形率结果如表2所示.





图 3 甜荞 1 号、2 号和苦荞球聚合模型 表 2 荞麦籽粒三维尺寸、等效直径、球形率

	长度/mm	宽度/mm	高度/mm	等效直径/mm	球形率
甜养	6.35	4.12	3.90	4.67	0.74
苦荞	5.48	2.88	2.69	3.47	0.63

2.3 接触力学模型

在离散单元法中,通常将颗粒与颗粒、颗粒与边界的接触力分解为法向接触力和切向接触力,并采用 不同的力学简化模型来进行模拟分析,常用的简化力学模型有线性粘弹性接触力学模型、赫兹(非线性)粘 弹性接触力学模型、半锁弹簧接触力学模型等^[11-14].荞麦种子在受到压力时,其变形接近于线性,因此本 文选用线性粘弹性接触力学模型.

2.4 仿真参数

建立荞麦播种器离散单元法仿真边界和荞麦种子颗粒模型并选取接触力学模型后,需确定仿真参数,包括种子法向刚度系数和切向刚度系数、种子阻尼系数等.

2.4.1 荞麦种子刚度系数

当接触形式为"颗粒-边界"时,法向刚度系数 k_a 取颗粒的刚度系数;当接触形式为"颗粒-颗粒"时,k_a 为

$$k_{n} = \frac{k_{1}k_{2}}{k_{1} + k_{2}} \tag{1}$$

式中, k₁, k₂ 为相接触两颗粒各自的法向刚度系数.

切向刚度系数 k_s为

$$k_s = 0.8k_n \tag{2}$$

经试验计算,3种荞麦种子的刚度系数如表3所示.

表 3 种子颗粒模型在不同接触形式下的刚度系数

甜养1号 甜养2号 苦 荞 刚度系数 接触形式 长度 宽度 高度 长度 宽度 高度 长度 宽度 高度 15.1 17.8 25.1 k" 颗粒与颗粒 30.7 37.5 27.8 20.9 26.2 30.6 30.2 颗粒与边界 61.3 74.9 35.6 52.4 55.6 41.8 52.4 61.2 k. 颗粒与颗粒 12.1 24.5 30.0 14.2 20.0 22.2 16.7 21.0 24.5 颗粒与边界 24.2 49.0 59.9 28.5 44.5 33.4 41.9 40.1 49.0

2.4.2 阻尼系数

当接触形式为"颗粒-边界"时,法向粘性阻尼系数 *c*_n 取颗粒的法向粘性系数;当接触形式为"颗粒-颗粒"时,*c*_n 为

$$c_{n} = \frac{2\ln e \sqrt{m_{0}k_{n}}}{\sqrt{\pi^{2} + \ln^{2}e}}$$
(3)

mm

其中,

4

$$m_{0} = \frac{m_{1}m_{2}}{m_{1} + m_{2}} \tag{4}$$

切向阻尼系数 c_s 为

$$r_s = \frac{2\ln e \sqrt{m_0 k_s}}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 e}} \tag{5}$$

式(3)、式(4)、式(5)中, e为碰撞恢复系数; m₁,m₂为相接触的两颗粒各自的质量.

综合以上内容,得到荞麦种子颗粒模型在不同接触方式下的阻尼系数如表4所示.

表 4 种子颗粒仿真模型在不同接触形式下的阻尼系数

mm

阳尼亥粉	按鈾形士	甜养1号		甜养2号				苦 养		
阻尼示奴	按照形式	长度	宽度	高度	长度	宽度	高度	长度	宽度	高度
<i>C</i> _{<i>n</i>}	颗粒与颗粒	0.47	0.68	0.75	0.38	0.45	0.47	0.36	0.40	0.43
	颗粒与边界	0.67	0.96	1.06	0.54	0.64	0.67	0.50	0.56	0.61
C _s	颗粒与颗粒	0.42	0.60	0.67	0.34	0.40	0.42	0.32	0.36	0.38
	颗粒与边界	0.60	0.85	0.94	0.48	0.57	0.60	0.45	0.50	0.54

3 仿真试验

仿真试验目的在于研究不同转速、凹槽半径和槽数对排种器排量的影响.若进行全面试验,每种荞麦种子需要做8组试验,3种种子共需要24组,试验量较大.正交试验具有正交性、代表性以及综合可比性^[15],选用*L*₄(2³)正交表对排种过程进行研究分析,可以将试验组数缩减至12组,并利用极差分析可以得到因子对指标影响的主次关系和试验范围内的最优组合.其因子水平表如表5所示.

表 5 因子水平表

T W		因 子	
水十	槽轮转速(A)/(r・min ⁻¹)	凹槽半径(B)/m	槽数(C)
1	24.25	0.002	16
2	55.67	0.003	20

3.1 试验指标

根据拖拉机作业速度及荞麦播种农艺要求,单个 排种器的理论排量为 3.79 g/s,因此选择正交试验指标 为 3.79 g/s.

3.2 试验方法

采用种子颗粒通过数统计方法,当颗粒模型通过监测区域后便不再纳入颗粒总数,以降低计算量,减少仿 真时间.仿真过程如图4所示,粒子工厂不断生成种子 颗粒落入排种盒中,通过统计监测区域单位时间内通过 的种子颗粒数便可得到排种器的排量.

3.3 排种器参数与排量关系仿真

在 EDEM 中以正交试验的方法, 仿真排种器对甜养 1号、甜养2号、苦养的排种过程, 分析其排量与槽轮转 速、凹槽半径、槽数的关系. 得到3种养麦种子试验结果 如表6所示.



粒子工厂; 2. 种子颗粒; 3. 外槽轮; 4. 监测区域.
图 4 仿真过程

计心口		甜养1	号			甜养 2	号			苦麦	خ ۲		指标值
诋短亏	А	В	С	排量	А	В	С	排量	А	В	С	排量	排量
1	1/24.25	1/2	1/16	0.40	1/24.25	1/2	1/16	0.40	1/24.25	1/2	1/16	0.30	3.79
2	1/24.25	2/3	2/20	1.95	1/24.25	2/3	2/20	1.95	1/24.25	2/3	2/20	1.19	
3	2/55.67	1/2	2/20	0.74	2/55.67	1/2	2/20	0.74	2/55.67	1/2	2/20	0.68	
4	2/55.67	2/3	1/16	3.36	2/55.67	2/3	1/16	3.36	2/55.67	2/3	1/16	2.74	
K_{1j}	2.35	1.14	3.76		1.91	1.03	3.36		1.53	1.02	3.08		
K_{2j}	4.10	5.31	2.69		3.73	4.61	2.28		3.42	3.93	1.87		
k_{1j}	1.18	0.57	1.88		0.96	0.52	1.68		0.77	0.51	1.54		
k_{2j}	2.05	2.66	1.35		1.87	2.31	1.14		1.71	1.97	0.94		
R_{j}	0.87	2.09	0.53		0.91	1.79	0.54		0.94	1.45	0.60		
因子主次		B>A>	>C			B>A>	>C			B>A>	>C		
最优组合		B_2A_2	C_1			$B_2 A_2 C$	C_1			$B_2 A_2 C$	C_1		

表 6 排种试验方案及结果

3.3.1 凹槽半径对排种器排量的影响

由表 6 可知:当试验号相同时,甜荞 1 号的排量最大,甜荞 2 号次之,苦荞排量最小,这是由于 3 个品种荞麦种子的容重不同引起的,容重越大,排量越大;3 个品种的排量随试验号的变化趋势相同,各试验号中,4 号排量最大,2 号次之,再次之为 3 号,1 号排量最小,表明凹槽半径对试验结果的影响较大,当凹槽 半径为 2×10⁻³ m 时,排种器排量远小于指标值,因此选择凹槽半径为 3×10⁻³ m.

表中 R_j 为水平均值极差, R_j 值越大,该因子对试验结果的影响越大.分析可知,凹槽半径对排量影响最大,其次为槽轮转速,槽数对排量的影响最小.3组正交试验中1至4号的排量均小于3.79g/s,因此 根据水平均值 k_{ij} 确定各因子的优水平时应取最大值,由此可得到工程最优组合为 B₂A₂C₁,即凹槽半径为 3×10⁻³ m、槽轮转速为55.67 r/min、槽数为16,但是该组合下的排量均未达到指标值,其原因可能是 A 因子(槽轮转速)与 B 因子(凹槽半径)的交互作用对试验结果造成的影响大于 C 因子(槽数)单独作用,因此 需进行补充试验验证.

凹槽半径选定为 3×10⁻³ m, 槽轮转速分别选用 24.25,38.17,55.67 r/min, 种子颗粒选择甜荞 1 号, 以槽数 16 和 20 作为槽数的两个水平, 对比试验结果如表 7 所示.

<u>抽 粉</u>		槽轮转速/(r・min ⁻¹)	
1首 奴 —	24.25	38.17	55.67
16	1.63	2.27	3.39
20	2.02	2.82	4.41

表 7 补充验证排量试验

由表 7 可知,在其他参数相同的情况下, 槽数为 20 时排种器的排量始终大于槽数为 16 时,因此实际工程最优组合为 $B_2A_2C_2$,即凹槽 半径为 3×10^{-3} m,槽轮转速为 55.67 r/min, 槽数为 20.

3.3.2 槽轮转速对排种器排量的影响

槽轮的凹槽半径为 3×10^{-3} m, 槽数为 20,将槽轮转速的水平划分为更小的梯度, 以 研究不同转速对排种器排量的影响,并检验 组合 $B_2A_2C_2$ 能否满足最大播量要求,得到排 种器转速与排量的关系曲线如图 5 所示.



由图 5 可知,3 种荞麦种子的排种器转速与排量关系曲线拟合程度相关系数 R² 都在 0.98 以上,排种器排量与槽轮转速呈近似线性关系.当排量达到指标值 3.79 g/s 时,甜荞 1 号排种轮转速为 47.85 r/min,甜荞 2 号排种轮转速为 55.96 r/min,苦荞排种轮转速为 58.58 r/min.由于本排种器设计为移动式,通过减小槽轮工作长度可以控制甜荞 1 号和 2 号的播量在要求范围之内,因此,为同时满足 3 个品种的最大播量要求,选择槽轮转速为 58.58 r/min.最终确定荞麦排种器参数如表 8 所示.

表 8 荞麦排种器参数

d/m	L/m	$n/(\mathbf{r} \cdot \min^{-1})$	r/m	z/\uparrow
0.06	0.03	58.58	0.003	20

4 台架试验

4.1 试验平台

为检验所设计的排种器的实际性能和仿真模型及仿真 结果的可靠性,设计荞麦排种器试验台如图6所示,试验台 主要由排种盒、调速电机、电机调速器、台架等组成.

4.2 槽轮转速对排种器排量的影响试验

在试验台架上,通过电机调速器控制电机转速,测定在 不同转速下排种器对各个品种荞麦种子的排量.在特定排 种器转速下,排种 30 s 后将排出的种子称质量,计算得到该 种子在该转速下的排种器排量.测定排量 5 次,取其平均 值,得到 3 种荞麦种子不同槽轮转速下排种器的排量.台架 试验结果与仿真试验结果对比如图 7 所示.



 调速电机; 2. 联轴器; 3. 排种轮; 4. 荞麦种子; 5. 排 种盒; 6. 轴承及轴承座; 7. 台架; 8. 电机调速器.

图 6 排种器性能试验台架



转速 /(r.min⁻¹)

图 7 排种器试验结果对比图

由图 7 可知,甜养1号台架试验与仿真试验的排量相对误差为 2.93%~8.65%,甜养2号台架试验与 仿真试验的排量相对误差为 3.07%~9.90%,苦养台架试验与仿真试验的排量相对误差为 5.26%~ 9.01%,整体相对误差为 2.93%~9.90%;排种器的排量随槽轮转速的增加而增加,且接近线性变化,总 体线性相关度系数 *R*² 大于 0.98;台架试验中未出现当槽轮转速超过某一转速值时排量减小的情况,槽轮 处于稳定工作状态.同一品种的荞麦种子,在相同转速下,台架试验测得排量值均大于仿真试验测得值, 这是由于仿真中对于种子的受力分析采用的是简化后的接触力学模型,与其在台架试验排种过程中的真实 受力情况存在差异.

4.3 各行排量一致性测试

根据 GB/T9478-2005《谷物条播机试验方法》和《农业机械试验方法汇编》,进行各行排量一致性测试. 将播种机架起,使地轮边缘离开地面,转动地轮,使其回转圈数按相当于在地面行进 50 m 折算而定(取整 圈数).将各行排出的种子收集到置于每个排种装置的下方的容器内,称质量并记录为*x_{ij}*,重复 5 次.对于 3 个品种的荞麦种子,其测试结果如表 9.

表 9 各行排量一致性变异系数

品种	甜养1号	甜养 2 号	苦养
各行排量一致性变异系数/%	3.7	4.3	4.1

由表9可知,3种荞麦种子各行排量一致性变异系数均小于4.5%,满足生产实际要求.

5 结 论

本文设计了一种荞麦播种机排种器,基于离散单元法建立了排种器、荞麦种子的仿真模型并进行了排 种器工作过程仿真试验.在仿真过程中针对 3 种典型荞麦种子,使用正交试验及补充试验研究了排种器的 排量与槽轮转速、凹槽半径、槽数的关系,并由此确定槽轮的主要参数.制作荞麦排种器性能试验台架并 进行台架试验,试验结果显示,相同品种的荞麦种子在同一排种器转速下台架试验中排种器的排量与仿真 试验中的排量相对误差为 2.93%~9.90%,荞麦排种器的排量随槽轮转速的增加而增加,且接近线性变 化,所设计的排种器对 3 种荞麦种子的排量均能满足播量要求.

参考文献:

- [1] 陈 辉,赵先琼,刘义伦,等.转筒内 D 型二元颗粒物料滚落模式的径向分离 [J].农业机械学报,2015,46(6): 334-340.
- [2] 李政权,于建群,张尉林,等.内充式排种器工作过程和性能的离散元法仿真分析 [J]. 农业工程学报,2011,27(11): 32-36.
- [3] 李心平, 熊 师, 杜 哲, 等. 浮动式玉米单穗脱粒装置设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 104-111.
- [4] ZHOU H B, CHEN Y, SADEK M A. Modelling of Soil-Seed Contact Using the Discrete Element Method (DEM) [J]. Biosystems Engineering, 2014, 121: 56-66.
- [5] 周海波,梁秋艳,魏天路,等.双级振动精密排种器外槽轮式定量供种装置设计与试验[J].农业机械学报,2016,47 (增刊):57-61,83.
- [6] BERTRAND F, LECLAIRE L A, LEVECQUE G. DEM-Based Models for the Mixing of Granular Materials [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(8-9): 2517-2531.
- [7] 张 涛,刘 飞,刘月琴,等.离散元模拟外槽轮排肥器排量分析 [J]. 农机化研究, 2015(9): 198-201.
- [8] ROMULI S, KARAJ S, MOLLER J. Discrete Element Method Simulation of the Hulling Process of Jatropha Curcas L. Fruits [J]. Biosystems Engineering, 2017, 155: 55-67.
- [9] 于建群,钱立彬,于文静,等.开沟器工作阻力的离散元法仿真分析 [J]. 农业机械学报,2009,40(6):53-57.
- [10] 汪博涛. 基于离散单元法的外槽轮排肥器工作过程仿真与参数优化 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [11] COETZEE C J, ELS D N J. Calibration of Discrete Element Parameters and the Modeling of Silo Discharge and Bucket Filling [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 65(2): 198-212.
- [12] PASHA M, HARE C, GHADIRI M, et al. Effect of Particle Shape on Flow in Discrete Element Method Simulation of a Rotary Batch Seed Coater [J]. Powder Technology, 2016, 296: 29-36.

- [13] CHEN Z R, YU J Q, XUE D M, et al. An Approach to and Validation of Maize-Seed-Assembly Modelling Based on the Discrete Element Method [J]. Powder Technology, 2018, 328: 167-183.
- [14] 赵亚兰,郭红兵.运用离散元法的物料颗粒体流动特性与储料斗结构优化研究 [J].重庆理工大学学报(自然科学版), 2018,32(9):82-90.
- [15] 邹振宇,叶 进,杨 仕,等. 新型烟苗剪叶机设计研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2016, 41(4): 101-108.

Design and Test of a Seed Metering Device for Buckwheat Seeder Based on the Discrete Element Method

LI Ming-sheng, YE Jin, LI Deng,

YANG Shi, ZENG Bai-gong, LIU Jian

School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: In order to optimize the optimum seed metering performance parameters of the external grooves seed metering device of the buckwheat sowing machine, and to meet the agronomic requirements of three kinds of typical buckwheat seeds, EDEM simulation analysis models of three typical buckwheat seeds were established by ball pellet polymerization, and the stiffness coefficients and damping coefficients of the three kinds of buckwheat seeds were tested under different contact forms. Numerical simulation of the precision seed metering device for buckwheat seeder was carried out based on the discrete element method. The L₄ (2³) orthogonal test method was used in the simulation of the seed metering device working process to study the effect of different speed, groove radius and slot number on the seed rate of the metering device. The simulation results showed that the seed metering device could meet the maximum demand for the seed of three kinds of buckwheat seeds when the radius of the groove was 3×10^{-3} m, the number of grooves was 20, and the rotation speed of the grooves was 58. 58r/min. The result of a bench test showed that the relative error of the buckwheat bench test and the simulation test was $2.93\% \sim 9.90\%$; the seed rate of the buckwheat seed metering device increased with the speed of the slot wheel, and the correlation coefficient of the overall linearity R^2 was over 0.98.

Key words: buckwheat; seed metering device; discrete element method; orthogonal test; bench test

责任编辑 汤振金