doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.016

磁吸板式排种器充种性能离散元仿真*

胡建平　周春健　侯　冲　王　静

(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室,镇江 212013)

摘要:论述了一种磁吸板式精密排种器结构及工作原理。以单列排种元件为研究对象,采用颗粒离散元法建立排种器仿真模型,分析了种箱移动速度、永磁体磁吸端面磁场强度和充种位置角对排种器充种性能的影响,得到各因素的最佳组合。仿真结果表明,影响排种器充种性能的主要因素是磁体端面磁场强度,其次是种箱移动速度。仿真及样机性能试验均表明,在永磁体端面磁场强度为 150 mT、种箱移动速度为 0.08 m/s、充种位置角为 110°条件下,排种器均具有较好的充种性能,其单播率仿真值为 89.57%,实际试验值达 87.93%,仿真与试验结果基本一致,证明离散元法仿真分析磁吸板式排种器的可行性,同时也表明磁吸板式精密排种器可用于小颗粒蔬菜种子的精密播种。

关键词:磁吸板式排种器　充种性能　离散元法　仿真分析

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2014)02-0094-05

引言

精密排种器是精密播种机的核心部件,其排种性能直接影响到播种机质量。以往排种器设计参数确定及优化大多依靠经验和实验方法,这些方法研发周期长、成本高,且不容易达到优化的目的。离散元法(Distinct element method,DEM)是用来计算散体介质系统(干散体、湿散体或两相悬浮体)力学行为的一种数值方法[1-2]。目前有学者已开始采用离散元法分析排种器各个参数对排种性能的影响,周德义等进行了散粒农业物料出流成拱的离散单元仿真[3];于建群等采用离散元法开展了型孔轮排种器、组合内窝孔排种器、内充式排种器的排种过程及工作性能仿真分析,结合实际试验证明了离散元法分析排种器的可行性[4-6];赵湛等以气吸振动式水稻排种器为研究对象开展了种群在种盘内的颗粒运动仿真分析,得到了满意结果[7-8]。

本文基于磁吸式精密排种原理提出一种磁吸板式精密排种技术[9],并运用颗粒离散元 EDEM 对其排种性能进行仿真分析,以了解影响其排种性能的主要因素及参数取值范围,为样机试制及优化提供依据。

1　磁吸板式精密排种器结构与工作原理

磁吸式排种依靠磁吸力实现精密排种,主要用于蔬菜、花卉等小颗粒种子的精密播种。目前,磁吸式排种器主要有螺管式、摆杆式和滚筒式,其中磁吸滚筒式排种器因能实现零气隙吸种、连续播种,其性能优于螺管式和摆杆式[10-12]。然而,磁吸滚筒式排种器只能实现单排连续播种,由于受充种时间的限制,使滚筒工作转速难以提高,从而影响排种器工作效率。为提高排种器工作效率,特设计一种磁吸板式排种器[9],如图 1 所示。磁吸板式精密排种器主要由磁吸头安装板、播种板、转轴、播种板安装架、导杆、种箱和永磁体磁吸头组成。其中,播种板安装在播种板安装架上,磁吸头安装板安装在播种板背面,播种板随播种板安装架上的转轴作旋转摆动;永磁体磁吸头按照穴盘孔数和孔距固定在磁吸头安装板上;种箱在齿轮齿条机构(图中未示出)驱动下可沿导杆作上下滑移。磁吸板式精密排种器主要依靠播种板的来回摆动、种箱沿导杆的上下移动以及磁吸头安装板相对播种板的前后移动来实现充种和排种。当播种板处于图 1 所示充种位置时,种箱沿导杆方向从最高位置向下滑移至最低位置,在种箱滑移过程中,种箱内的磁粉包衣种子在播种板上滚过的同时吸附在磁吸头端面上;当播种板向下转动至水平位置,穴盘输送架上的 4 个顶杆顶住磁吸头安装板,使磁吸头磁吸端缩进播种板上的小孔内,吸附在磁吸头端面的种子随之被强制清理掉落在穴盘孔

收稿日期:2013-02-17　修回日期:2013-03-13

*江苏省高校自然科学基金重点资助项目(11KJA210001)、江苏省青蓝工程资助项目(苏教师(2010)27 号)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏财教(2011)8 号)和江苏省科技支撑(农业)资助项目(BE2011348)

作者简介:胡建平,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计研究,E-mail:hujp@ujs.edu.cn

内，实现强制排种。与磁吸滚筒式排种相比，磁吸板式排种不仅能实现零气隙吸种，而且可实现一次充种整盘播种，从而提高了排种器工作效率。

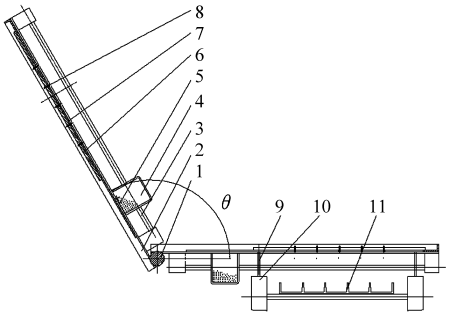


图 1　磁吸板式精密排种器工作原理

Fig. 1　Working principle diagram of magnetic plate precision seed-metering device

1. 转轴　2. 播种板安装架　3. 导杆　4. 种箱　5. 磁粉包衣种子　6. 永磁体安装板　7. 播种板　8. 永磁体磁吸头　9. 顶杆　10. 穴盘支架　11. 穴盘

2　充种颗粒运动离散元仿真建模与参数确定

磁吸板式排种器充种过程中始终伴随着大量种子的颗粒运动，并存在着磁场力、重力、摩擦力等多种力的综合作用，采用颗粒离散元仿真分析排种器充种颗粒运动情况，不仅能真实了解影响排种性能的主要因素及参数的合理取值范围，而且减少了样机试制的盲目性。

2.1　接触模型的建立

接触模型是离散元法的重要基础，其实质就是准静态下颗粒固体的接触力学弹塑性分析结果。接触模型的分析计算直接决定了颗粒所受的力和力矩的大小。对不同的仿真对象，必须建立不同的接触模型。由于磁吸式精密排种种子需要进行磁粉包衣丸粒化处理，种子颗粒类似于球形颗粒，且颗粒表面没有粘附力，故选取 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型作为颗粒与颗粒之间以及颗粒与排种器之间的接触模型[13]。

2.2　几何模型的建立

几何模型是仿真中颗粒所接触到的机器或物体实体，在 EDEM 中建立几何模型有两种方法：一种是利用软件自带的几何体为基础创建几何模型；另一种是从其他 CAD 软件导入自定义的几何模型。本文选择利用软件自身所带的几何体来创建排种器的几何模型。为了减少仿真计算量，选取播种板上一列永磁体来进行排种器充种性能仿真，因此其几何模型简化为只有一列磁吸头（按 72 孔穴盘设计，取一列 6 个磁吸头），播种板（长 × 宽 × 高）为 560 mm × 40 mm × 3 mm、磁吸头端面直径为 2 mm、种箱尺寸（长 × 宽 × 高）为 40 mm × 30 mm × 30 mm。

2.3　种子仿真参数的确定

选用铁粉质量分数为 10% 的磁粉包衣油菜种子为测试对象，测得裸种种子平均粒径为 1.8 mm，磁粉包衣丸粒化后的平均粒径为 3.4 mm，丸粒化种子颗粒尺寸按正态分布，方差为 0.05。仿真时颗粒参数如表 1 所示，其中种子密度、剪切模量，恢复系数及摩擦因数由试验测得[13-14]。其次，仿真时间步长取 $\Delta T = 0.15\Delta T_r$，$\Delta T_r$ 为瑞利时间步长，是一个剪切波传过一个固体颗粒所用的时间，ΔT_r 设为 1.98×10^{-6} s[15]。

表 1　磁粉包衣油菜种子颗粒离散元仿真参数

Tab. 1　Particle parameters for DEM simulation

参数	数值
种子半径/mm	1.7
种子密度/(kg·m^{-3})	2 100
剪切模量/MPa	447.92
泊松比	0.28
种子与钢板之间的动摩擦因数	0.085
种子与钢板之间的静摩擦因数	0.110
种子与种子之间的动摩擦因数	0.385
种子与种子之间的静摩擦因数	0.385
种子与钢板的碰撞恢复系数	0.38
种子与种子的碰撞恢复系数	0.30

2.4　磁吸力数值模型的建立

磁粉包衣种子不同磁场强度和气隙高度下所受磁吸力由分析天平（精度为 10^{-4} g）称量测得[13]。具体方法：在分析天平上盖安装一千分尺，千分尺底部固定永磁体磁吸头；在天平托台上放置一非导磁性底座，磁粉包衣种子粘贴在底座上部，并使种子位于永磁体正下方；通过拨动千分尺来调整永磁体端面与种子之间的气隙高度，测得种子在磁场中受到磁吸力后质量的变化值 Δm，磁粉包衣种子所受磁吸力为 $F_m = \Delta mg$，试验结果如表 2 所示。为了得到磁粉包衣种子所受磁吸力随磁吸端面气隙高度变化的关系，对所得数值进行拟合，得到 100、150 和 200 mT 3 种磁场强度下磁吸力关于气隙高度之间的数学模型分别为

$$y_{100} = 0.005\,71e^{-0.249\,8x} \tag{1}$$

$$y_{150} = 0.007\,256e^{-0.249\,6x} \tag{2}$$

$$y_{200} = 0.008\,911e^{-0.249\,6x} \tag{3}$$

式中　y——磁吸力，N

x——永磁体端面气隙高度，mm

使用 C 语言对所得拟合函数进行编译，生成颗粒体力插件，通过离散元软件 EDEM 的 API 接口完成磁力加载[13]。

表 2 不同磁场强度下磁粉包衣种子所受磁吸力

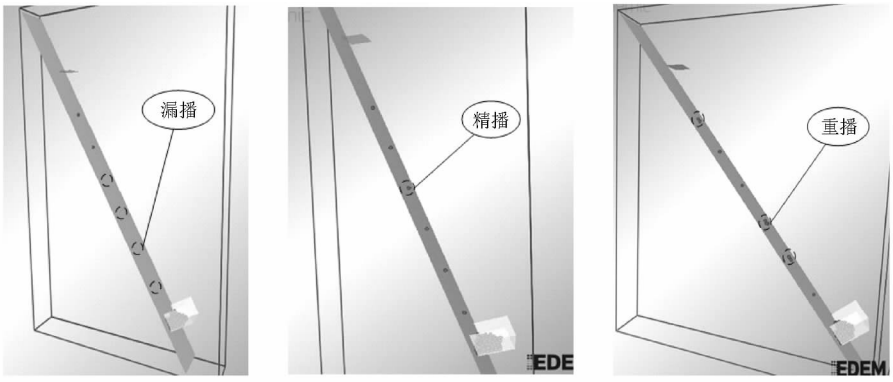
Tab. 2 Calculated value of magnetic force with different magnetic field strength mN

磁场强度 /mT	气隙高度/mm									
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
100	3.6	2.7	1.8	1.1	0.64	0.37	0.21	0.13	0.08	0.05
150	4.5	3.4	2.3	1.4	0.80	0.46	0.27	0.16	0.10	0.06
200	5.6	4.2	2.8	1.7	0.99	0.57	0.34	0.20	0.12	0.08

3 充种性能仿真

3.1 仿真因素

由磁吸板式排种原理可知,磁吸头端面磁场强度将直接影响磁粉包衣种子所受磁吸力,充种位置角 θ 将影响种子颗粒在播种板上的受力状况,种箱移动速度 v 将影响种子的充种吸附时间。因此,初步认为磁吸头端面磁场强度 B、充种位置角 θ、种箱移动速度 v 是影响充种性能的主要因素。为了确切了解上述因素对排种性能的影响,首先在磁场强度 $B=100$ mT、充种位置角 $\theta=120°$、种箱移动速度 $v=0.1$ m/s 条件下进行充种性能仿真试验,试验结果如图 2a 所示,由图 2a 可知,一组 6 个磁吸头有 4 个出现漏播,漏播率较高;为此,提高磁场强度 B 至 150 mT、减小充种位置角 θ 至 110°和种箱移动速度 v 至 0.06 m/s, 一组 6 个磁吸头均实现了单粒精播,如图 2b 所示;维持磁场强度 B 为 150 mT,将充种位置角 θ 提高至 130°、种箱移动速度 v 提高至 0.08 m/s, 一组 6 个磁吸头有 3 个出现了重播,重播率较高。通过上述仿真分析发现:磁场强度、充种位置角、种箱移动速度对充种性能的影响较大,只有合理设置上述 3 个参数,才能得到较高的充种精度。



(a) (b) (c)

图 2 不同因素水平下的充种性能仿真结果

Fig. 2 Effect of seeding simulation

(a) $B=100$ mT, $\theta=120°$, $v=0.1$ m/s (b) $B=150$ mT, $\theta=110°$, $v=0.06$ m/s (c) $B=150$ mT, $\theta=130°$, $v=0.08$ m/s

3.2 充种性能仿真正交试验

为了进一步得到影响充种性能的主次因素及合理水平,选取种箱移动速度 v、充种位置角 θ 和磁场强度 B 为试验因素,以单播率 S、漏播率 L、重播率 D 为试验指标,选用 $L_9(3^4)$ 表进行充种性能仿真正交试验,试验因素水平选取及仿真试验结果如表 3 所示。

根据仿真结果,比较极差 R 值,各因素对单播率的影响由大到小依次排序为 B、v、θ,对漏播率的影响由大到小依次排序为 θ、B、v,对重播率的影响由大到小依次排序为 B、θ、v。单粒率在 $v=0.06$ m/s、$\theta=110°$、$B=150$ mT 时达到最高 87.16%;漏播率在 $v=0.08$ m/s、$\theta=110°$、$B=200$ mT 时达到最低为零;重播率在 $v=0.08$ m/s、$\theta=120°$、$B=100$ mT 时达到最低为 10.72%。由正交试验得出排种器最优参数组合为种箱移动速度 0.06 m/s、充种位置角 110°、

表 3 仿真正交试验设计与结果

Tab. 3 Results of orthogonal experiments

序号	种箱移动速度 v/(m·s^{-1})	充种位置角 θ/(°)	磁场强度 B/mT	单播率 S/%	漏播率 L/%	重播率 D/%
1	0.04	110	100	84.46	1.65	13.89
2	0.04	120	150	83.57	2.42	14.01
3	0.04	130	200	79.25	2.03	18.72
4	0.06	110	150	87.16	1.12	11.72
5	0.06	120	200	84.54	1.84	13.62
6	0.06	130	100	82.61	1.67	15.72
7	0.08	110	200	66.55	0	33.45
8	0.08	120	100	85.71	3.57	10.72
9	0.08	130	150	83.08	1.65	15.27
S_1	247.28	238.17	252.78			
S_2	254.31	253.82	253.81			
S_3	235.34	244.95	230.34			
R_S	6.32	5.22	7.82			
L_1	6.1	2.77	6.89			
L_2	4.63	7.83	5.19			
L_3	5.22	5.35	3.87			
R_L	0.49	1.69	1.01			
D_1	46.62	59.06	40.33			
D_2	41.06	38.35	41			
D_3	59.44	49.71	65.79			
R_D	6.13	6.90	8.49			

磁场强度 150 mT，此时单播率为 87.16%。

4　充种性能仿真与试验对比

为了验证离散元仿真结果的有效性，同时实际检验排种器工作性能，以研制的磁吸板式精密排种器为试验样机进行台架试验，种子仍为铁粉质量分数为 10% 的磁粉包衣油菜种子，样机如图 3 所示。根据仿真试验结果，定制汝铁硼永磁体磁吸头端面磁场强度为 150 mT、直径为 2 mm、播种板充种位置角固定为 110°，在此条件下，改变种箱移动速度，通过统计播种板吸种种子数来考察排种器的充种性能。试验结果及仿真结果如表 4 所示。

图 3　磁吸板式精密排种器

Fig. 3　Magnetic plate precision seed-metering device

表 4　不同种箱移动速度下排种器充种性能仿真与试验对比

Tab. 4　Simulation and experimental contrast on different seed box moving speed

种箱移动速度/(m·s^{-1})	单播率 S/%			重播率 L/%			漏播率 D/%		
	仿真值	试验值	仿真与试验值相对误差	仿真值	试验值	仿真与试验值相对误差	仿真值	试验值	仿真与试验值相对误差
0.04	81.67	84.46	3.30	18.33	13.89	31.97	0	1.65	
0.06	87.16	86.72	0.51	11.72	11.98	2.17	1.12	1.30	13.85
0.08	89.57	87.93	1.86	7.86	8.94	12.08	2.57	3.13	17.89

由表 4 可知，充种性能各项指标的仿真值与试验值随充种速度的变化趋势基本相同；单播率仿真与试验值相对误差最大为 3.3%，重播率最大误差 31.97%，漏播率最大误差为 17.89%。在种箱移动速度为 0.08 m/s 时，单播率仿真值达 89.57%，实际试验值达 87.93%；重播率仿真值为 7.86%，实际试验值为 8.94%；其充种性能略高于种箱移动速度 0.06 m/s 时的试验结果。仿真分析与试验结果基本吻合，证明了离散元分析的可行性，同时表明磁吸板式排种器具有较高的排种精度。

5　结论

(1)基于磁吸式排种原理，提出了一种磁吸板式精密排种技术，论述了排种器结构及工作原理。与磁吸滚筒式排种器相比，该排种器可实现一次充种整盘播种，因而具有充种时间充分、播种效率高的特点。

(2)采用颗粒离散元法，建立了由单列排种元件组成的磁吸板式排种器离散元仿真模型，确定了仿真参数。仿真分析了磁吸端面磁场强度、充种位置角、种箱移动速度对排种器充种性能的影响，结合仿真正交试验确定了影响充种性能的主次因素及最佳组合。仿真得出在磁吸头端面磁场强度 150 mT、种箱移动速度 0.08 m/s、充种位置角 110°条件下单粒精播率可达 89.57%。

(3)通过不同种箱移动速度下排种器充种性能的仿真与实际试验对比分析，得出两者变化趋势一致，实际试验与仿真试验结果基本相符，由此证明用颗粒离散元法仿真分析磁吸板式精密排种器充种性能的可行性和有效性。

参　考　文　献

1　Cundall P A, Strack O L. A discrete numerical model for granular assembles[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47 – 65.

2　Lu Z, Negi S C, Jofriet J C. A numerical model for flow of granular materials in silos. Part 1: Model development[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 68(3): 223 – 229.

3　周德义，马成林，左春柽，等. 散粒农业物料孔口出流成拱的离散单元仿真[J]. 农业工程学报，1996, 12(2): 186 – 189.
Zhou Deyi, Ma Chenglin, Zuo Chuncheng, et al. Discrete element simulation for arch flowing of agricultural particle material in outlet[J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(2): 186 – 189. (in Chinese)

4　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.
Li Zhengquan, Yu Jianqun, Zhang Weilin, et al. Simulation analysis of working process and performance of inside-filling seed metering device by discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 32 – 36. (in Chinese)

5　于建群，王刚，心男，等. 型孔轮式排种器工作过程与性能仿真[J]. 农业机械学报，2011, 42(12): 83 – 87.
Yu Jianqun, Wang Gang, Xin Nan, et al. Simulation analysis of working process and performance of cell wheel metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 83 – 87. (in Chinese)

6 于建群,申燕芳,牛序堂,等. 组合内窝孔精密排种器清种过程的离散元法仿真分析[J]. 农业工程学报,2008,24(5): 105 - 108.
Yu Jianqun, Shen Yanfang, Niu Xutang, et al. DEM simulation and analysis of the clearing process in precision metering device with combination inner-cell[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(5):105 - 108. (in Chinese)
7 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)
8 李耀明,赵湛,陈进,等. 气吸振动式排种器种盘内种群运动的离散元分析[J]. 农业机械学报,2009,40(3): 56 - 59.
Li Yaoming, Zhao Zhan, Chen Jin, et al. Discrete element method simulation of seeds motion in vibrated bed of precision vacuum seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(3): 56 - 59. (in Chinese)
9 胡建平. 永磁吸头板式精密播种器:中国,CN 102511223 A[P]. 2012 - 06 - 27.
10 伊腾信孝,鬼頭孝治. 電磁加速播種の可能性について[C]//日本植物工場學會平成 5 年度大會學術講演要旨集 1993:80 - 81.
11 胡建平,侯俊华,毛罕平. 磁吸式穴盘精密播种机的研制及试验[J]. 农业工程学报,2003,19(6):122 - 125.
Hu Jianping, Hou Junhua, Mao Hanping. Development and test of the magnetic precision seeder for plug seedlings [J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(6):122 - 125. (in Chinese)
12 胡建平,李宣秋. 磁吸滚筒式精密排种器试验及参数优化[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 115 - 117.
Hu Jianping, Li Xuanqiu. Experiment and parameter optimization of magnetic precision cylinder-seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 115 - 117. (in Chinese)
13 王静. 磁吸板式精密排种器充排种过程动力学建模与仿真分析[D]. 镇江:江苏大学,2012.
Wang Jing. Dynamics modeling and simulation analysis of seed filling and metering process on magnetic plate precision seed-metering device [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012. (in Chinese)
14 邵秀平. 基于离散元法的磁吸式精密排种器充种颗粒运动仿真及试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2011.
Shao Xiuping. Particle kinematic simulation and experimental study on the process of magnetic precision seed-meter sucking seeds based on DEM [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011. (in Chinese)
15 王国强,郝万军,王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.

Simulation Analysis of Seed-filling Performance of Magnetic Plate Seed-metering Device by Discrete Element Method

Hu Jianping Zhou Chunjian Hou Chong Wang Jing
(*Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology*, *Ministry of Education*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: The structure and working principle of a magnetic plate precision seed-metering device were introduced. In order to understand the seed-filling performance, the single-row permanent magnet metering elements were made as the research object and the simulation model was established by using particle discrete element method. The seed box moving speed, the magnetic suction surface magnetic field intensity, and the effect of filling position angle on seed-filling performance were simulated, and the best combination of all factors was obtained. The simulation results showed that the main factor influence filling properties was the surface magnetic field intensity of permanent magnet, and the second was the seed box moving speed. Both prototype test and simulation test showed that the metering device had good performance under these conditions of the permanent magnet magnetic field strength 150 mT, seed box moving speed 0.08 m/s, and the filling the position angle 110°. The simulation test value of the single seeding rate was 89.57%, and the actual test value was 87.93%. Simulation and test results were consistent. The results proved that it was feasible using discrete element method to analyze the performance of magnetic plate seed-metering device, and the magnetic plate precision seed-metering device could be used for small particles of vegetable seeds.

Key words: Magnetic plate type Seed-metering device Seed-filling performance Discrete element method Simulation analysis