

基于离散单元法的水平圆盘式精量排种器排种仿真试验

石林榕¹, 吴建民¹, 孙伟¹, 张锋伟¹, 孙步功¹, 刘全威², 赵武云^{1*}

(1. 甘肃农业大学工学院, 兰州 730070; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为了优化水平圆盘式精量排种器的最佳排种性能参数(动排种盘转速、动排种盘厚度、型孔圆角半径), 达到提高粒距合格指数、降低漏播和重播指数指标, 并降低大田试验强度。该文基于离散单元法对根据全膜双垄沟播技术所设计的水平圆盘式精量排种器进行了排种数值模拟, 并得到玉米籽粒模型排种、重播、漏播的形成过程; 为提高其排种性能, 进行了排种仿真试验。仿真结果表明: 以合格指数较高为重点、兼顾重播指数和漏播指数较低的原则, 确定了动排种盘转速为 17 r/min、动排种盘厚度为 6 mm、型孔上边倒圆角半径为 1 mm 时为较优组合, 此时粒距合格指数 $S=97.05\%$ 、重播指数 $D=1.83\%$ 、漏播指数 $M=1.12\%$ 。田间验证试验表明: 在上述条件下, 测得粒距合格指数为 $S=95.13\%$, 重播指数 $D=2.34\%$, 漏播指数 $M=2.53\%$, 重点指标粒距合格指数误差 2.02% ($<5\%$)。因此, 基于离散单元法的排种器仿真试验为排种器性能参数的确定提供参考。

关键词: 农业机械; 数值方法; 优化; 排种器; 离散单元法

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.08.005

中图分类号: S223.2*3

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-08-0040-09

石林榕, 吴建民, 孙伟, 等. 基于离散单元法的水平圆盘式精量排种器排种仿真试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 40-48.

Shi Linrong, Wu Jianmin, Sun Wei, et al. Simulation test for metering process of horizontal disc precision metering device based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(8): 40-48. (in Chinese with English abstract)

0 引言

在大田种植机械中谷物播种机发挥着重要作用, 而排种器是播种机的关键部件。排种器功能、效果的好坏将直接影响农作物种植质量、种植成本和后期工作量。精量排种器按其工作原理分为机械式和气力式。气力式排种器对种子具有适应性强、损伤轻等优点, 但其结构复杂, 成本和技术要求较高。而机械式排种器对种子尺寸要求严格, 存在高速作业适应性差及种子破损率高等问题, 但生产成本低、结构简单。机械式水平圆盘式精量排种器具有充种行程长, 克服了垂直圆盘式、窝眼轮式和孔带式排种器排种过程中种子杂乱排列的问题, 且其囊种性能和囊种率较高、结构简单、造价低廉、便于制造、易于大面积推广^[1]。国内外在 20 世纪 70 年代就对其进行了广泛的研究, 主要集中在棉籽和玉米穴播方面。通过对水平圆盘排种器的研究, Garci 发现型孔的形状、尺寸对排种精度有着重要的影响^[2]。

Wang 根据种子的几何尺寸设计型孔结构及尺寸, 同时对水平圆盘排种器进行了结构参数优化设计^[3]。目前, 国外精量播种机主要向大型、高效、操作和控制电子化发展, 排种器主要采用气力式。在国内宋井玲等设计了一种型孔深度可变的排种器, 通过改变型孔深度, 提高了排种器对不同形状、尺寸种子的适应性^[4]。梁天也等对水平圆盘精量排种器的结构进行了改进设计和试验, 田间试验中种子破碎率达到 8%~20%^[5]。廖庆喜等根据种子几何尺寸分布的特点及种子囊入型孔的状态特征, 从理论上建立了型孔参数设计的数学模型, 为水平圆盘精量排种器型孔参数的设计及根据不同种子类型选择型孔型式提供依据^[6-7]。赵武云等采用安装有水平圆盘精量排种器的玉米全膜双垄沟直插式精量穴播机在大田播种试验中取得了良好的效果^[8]。

目前, 全膜覆盖双垄沟播在甘肃省推广面积已突破 6 667 万 hm^2 , 但甘肃存在着机械化作业水平、农民收入普遍较低等现状^[9-10]。因此设计推广适合甘肃省情的机械式水平圆盘式精量排种器已迫在眉睫。应用离散单元法优化玉米精量排种器性能参数以提高排种性能的仿真试验方法未见报道。本文基于离散单元法对所设计的一种适合甘肃全膜双垄沟播玉米水平圆盘式精量排种器进行排种仿真试验, 并对主要影响排种性能的参数进行优化, 并

收稿日期: 2013-10-27 修订日期: 2014-03-18

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD14B10)

作者简介: 石林榕, 男, 甘肃陇南西和县人, 主要从事农业工程技术与装备研究。兰州 甘肃农业大学工学院, 730070。Email: getmao@qq.com

*通信作者: 赵武云(1966—), 男, 甘肃兰州人, 博士, 教授, 主要从事农业工程技术与装备研究。兰州 甘肃农业大学工学院, 730070。Email: zhaowuy@gsau.edu.cn

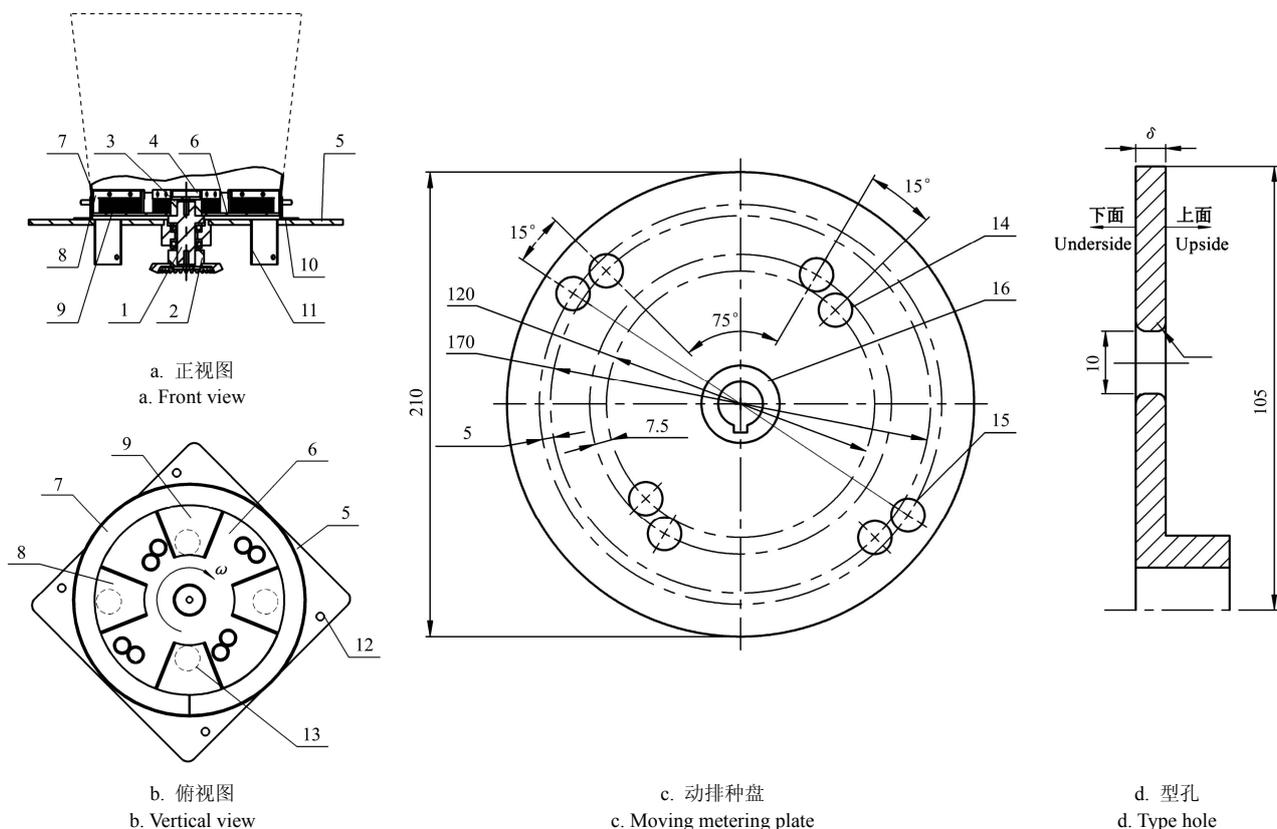
对优化结果进行大田试验验证。

1 水平圆盘精量排种器结构和工作原理

1.1 结构

如图 1 所示，水平圆盘精量排种器由排种轴、锥齿轮、排种轴端盖 I、排种轴端盖 II、定排种盘、动排种盘、种箱、刷种架、种刷、固定底座和输种管等组成。动排种盘是水平圆盘排种器的核心部件之一，它的设计合理直接关系到排种质量。为实现精量排种，型孔分内型孔和外型孔，内外型孔夹角为 90° 。排种器工作时，由于内外型孔直径的不同，动排种盘上的内外型孔均需旋转 180° 至定排种盘

相应的内外输种管处排种；为使该排种过程精量且漏播率低，内外型孔各增加 1 副排种孔，内排种孔与内副排种孔位置圆半径差为 d_1 ，夹角为 β ，外排种孔与外副排种孔位置圆半径差为 d_2 ，夹角为 γ ；型孔外径 d 根据玉米统计尺寸设计为 11 mm 。为使玉米籽粒易被种刷刷至型孔内，型孔上边倒圆角。为降低玉米籽粒的破损率，型孔下边倒 2 mm 圆角。种刷安装在刷种架两边，共 8 条，安装时通过螺母调整左种刷与动排种盘间距为 1.5 mm ，右种刷与动排种盘间距为 0.5 mm ，种刷材料采用猪鬃，因猪鬃具有刚韧、富有弹性，不易变形，耐潮湿，不受冷热影响等特点^[11]。



1. 轴 2. 锥齿轮 3. 排种轴端盖 I 4. 排种轴端盖 II 5. 定排种盘 6. 动排种盘 7. 种箱 8. 刷种架 9. 种刷 10. 固定底座 11. 排种管
12. 螺栓孔 13. 排种孔 14. 内型孔 15. 外型孔 16. 孔

1. Axis 2. Bevel gear 3. Sower cover I 4. Sower cover II 5. Fixed metering plate 6. Moving metering plate 7. Seed box 8. Frame of brushing seed 9. Seed brush 10. Fixed base 11. Seeding tube 12. Bolt hole 13. Seeding hole 14. Internal type hole 15. External type hole 16. Hole
注: δ 为动排种盘厚度, mm; ω 为动排种盘的角速度。

Note: δ is thickness of moving metering plate, mm; ω is angular speed of moving metering plate.

图 1 水平圆盘式精量排种器结构图

Fig.1 Structure of horizontal disc precision metering device

1.2 工作原理

排种器工作时，玉米籽粒填充种箱 7，动排种盘 6 在轴 1 的带动下作周期性旋转，籽粒在重力及离心力作用下落入动排种盘 6 型孔 14 和 15 内，在动排种盘 6 旋转过程中刷种架 8 上的种刷 9 刮掉多余的种子，当动排种盘 6 的型孔 14 和 15 旋转至定排种盘的排种孔 13 的相应位置，玉米籽粒在重力

作用下通过安装于定排种盘 5 上的排种管 11 掉入成穴器口。

2 排种器仿真模型的建立

2.1 仿真参数确定

试验材料选取金穗 4 号、吉祥 1 号、农化 101 偏马齿型饱满、无损伤、无虫害的玉米籽粒，籽粒

含水率在 13.2% 左右。分别挑选 3 个品种形状均匀的玉米籽粒各 10 粒, 用天平称其质量, 将其分别放入有一定体积水的 20 mL 试管中, 测定其体积。利用密度公式对 3 个品种玉米籽粒进行计算, 然后取平均, 玉米籽粒平均密度为 $1\ 250\ \text{kg/m}^3$ 。

对 3 个品种玉米籽粒进行整体弹性模量测定, 采用基于压痕加载曲线的弹性模量计算方法测定^[12]。然后取平均, 平均弹性模量为 216.6 MPa。

为方便测定玉米籽粒泊松比, 制作长约 12 mm, 宽约 8 mm, 厚约 4 mm 长方体测定块。测定设备有 CMT2502 万能试验机(深圳新三思)、游标卡尺(精度 0.01 mm)、XL2118 静态应变测定仪(应变分辨率 $1\ \mu\epsilon$)、电阻应变片(4 mm×7.5 mm)、240~360 目系列砂纸、502 快干胶及电线电烙铁等。试验方法: 使用砂纸将玉米籽粒磨成长方体试样(9 mm×9 mm×3 mm); 在试样两面分别沿纵向、横向用 502 快干胶粘贴电阻应变片; 将不同颜色导线焊接于电阻应变片上; 将导线另一端连接到 XL2118 测定仪上, 再将试样置于 CMT2502 试验机上, 最后对试样进行的轴向压缩试验; 每个玉米品种制作 2 个试样, 共 6 个试样。分别用 30、90、150 N 加载力进行压缩试验, 取平均值为 0.357。测定过程如图 2 所示。

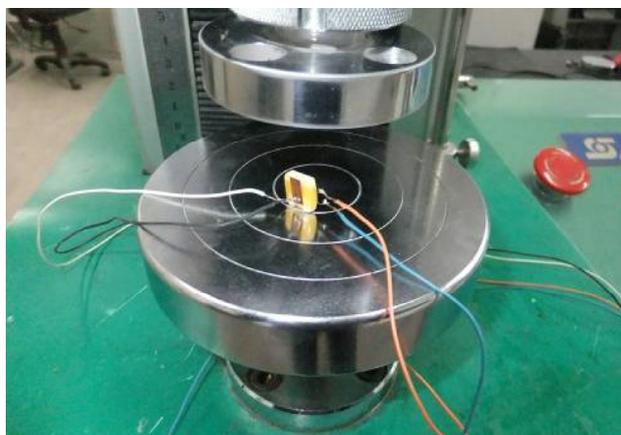


图 2 玉米籽粒泊松比测定

Fig.2 Measurement of Poisson's ratio of corn grain

仿真参数如表 1、表 2 所示, 其他参数见文献[13-14]。

表 1 排种器仿真模型材料参数

Table 1 Material parameter of simulation model of metering device

材料 Material	泊松比 Poisson's ratio	剪切模量 Shear modulus/MPa	密度 Density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
玉米 Corn	0.357	2.17×10^2	1250
钢 Steel	0.28	3.5×10^4	7850
种刷 Seed brush	0.40	1×10^2	1150

表 2 排种器仿真模型的材料接触参数

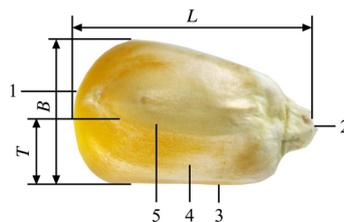
Table 2 Material contact parameters of simulation model of metering device

接触形式 Form of contact	恢复系数 Coefficient of restitution	静摩擦系数 Coefficient of static friction	动摩擦系数 Coefficient of rolling friction
玉米-玉米 Corn-Corn	0.60	0.5	0.01
玉米-壁面 Corn-Steel	0.60	0.3	0.01
种刷-玉米 Seed brush-Corn	0.45	0.5	0.01

2.2 玉米离散模型的建立

2.2.1 外观尺寸统计

型孔形状和尺寸对玉米播种质量有重要的影响。为保证水平圆盘式排种器投种的精量化和设计的简洁性, 保证型孔恰好容纳 1 粒种子, 根据全膜覆盖双垄沟播栽培技术使用尺寸较大的玉米种子进行统计。分别取 100 粒体积较大的金穗 4 号、吉祥 1 号、农化 101 马齿形玉米种子, 测量籽粒长 L 、宽 B 、厚 T (图 3)。3 种玉米籽粒统计尺寸平均值如表 3 所示。3 种玉米籽粒平均长 10.86 mm, 平均宽 7.22 mm, 平均厚 5.12 mm。



1. 冠部 2. 脐部 3. 背面 4. 侧面 5. 腹面

1. Crown 2. Umbilical part 3. Back face 4. Lateral 5. Ventral face

注: L 为玉米籽粒长度, mm; B 为玉米籽粒宽度, mm; T 为玉米籽粒厚度, mm。

Note: L is length of corn grain, mm; B is width of corn grain, mm; T is thickness of corn grain, mm.

图 3 玉米籽粒外形尺寸

Fig.3 Overall dimension of corn grain

表 3 玉米籽粒的外形尺寸统计

Table 3 Overall dimension of corn grain

品种 Varieties	平均长度 L Average length/mm	平均宽度 B Average width/mm	平均厚度 T Average thickness/mm
金穗 4 号 Jinsui 4	11.21	7.89	5.34
吉祥 1 号 Luck 1	10.94	7.53	5.24
农化 101 Agrochemical 101	10.43	6.24	4.78

挑选与统计值相接近金穗 4 号(白银金穗种业有限公司和甘肃农业大学联合研制)玉米籽粒沿宽度 B 方向进行切片, 每片厚度大约为 1 mm, 在白纸上绘制边长 10 mm 的正方形, 将切片放置于正方形内, 垂直于切片方向使用数码相机进行图像采集。应用 Photoshop 对切片图像进行裁剪和尺寸调整, 使其仅保留正方形区域。将调整后的玉米切片

图像导入 AutoCAD 软件中，借助软件中样条曲线命令在正方形内沿玉米切片轮廓进行截面轮廓形状描绘，重复以上操作，将整个玉米的每个切片的轮廓线条都描绘出来，分别保存为.Dwg 格式文件。

2.2.2 模型的建立

在 Solidworks 中建立间距为 1 mm 的 9 个基准面，将绘制的.Dwg 文件按照玉米籽粒切片自顶向下的顺序逐个插入到对应的基准面上^[15-17]，并按尺寸调整后的正方形四角点逐点对齐（图 4a）。采用扫描命令选取所有截面轮廓线进行实体扫描，扫描完成的玉米三维模型如图 4b^[18]。本文采用球颗粒聚合方法建立了玉米籽粒离散模型^[14-22]（图 4c），并借助 EDEM 软件自动计算玉米籽粒模型质心。

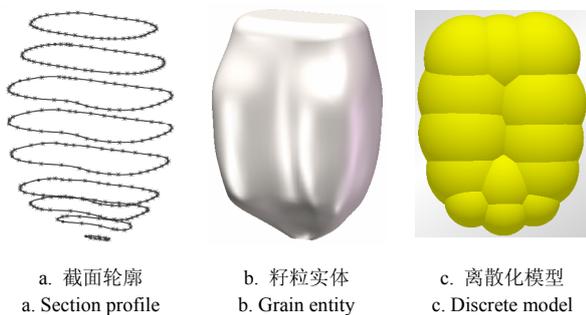
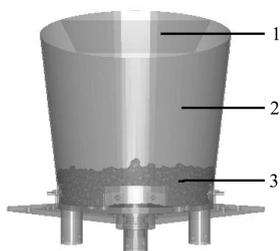


图 4 玉米籽粒模型
Fig.4 Model of corn grain

2.3 排种器模型的建立

为了便于模拟和计算，仅考虑玉米籽粒，而不考虑其他杂余。将水平圆盘式精量排种器三维模型以.X_T 格式导入 EDEM 软件中并进行必要的仿真设置：玉米模型生成平面生成籽粒的速率为 2 000 个/s，籽粒总数为 1 000 个。仿真参数设置完成后所建立的水平圆盘式精量排种器仿真模型如图 5 所示。



1. 玉米模型生成平面 2. 排种器 3. 玉米颗粒群
1. Plane of generating corn model 2. Metering device 3. Corn particles

图 5 水平圆盘式精量排种器仿真模型

Fig.5 Simulation model of horizontal disc precision metering device

3 仿真试验

3.1 试验方法

EDEM 为多用途的离散单元法软件。可用球颗

粒聚合法拟合真实玉米颗粒形状，再添加机械、材料和其他的物理属性来建立玉米颗粒模型，并使用所建立的玉米颗粒模型生成平面将其在种箱内生成，最后再利用 EDEM 强大的数据分析工具和三维可视化工具进行数据后处理。本文将 EDEM 仿真技术与正交试验设计结合，对水平圆盘式精量排种器关键性能参数进行优化^[23-25]。

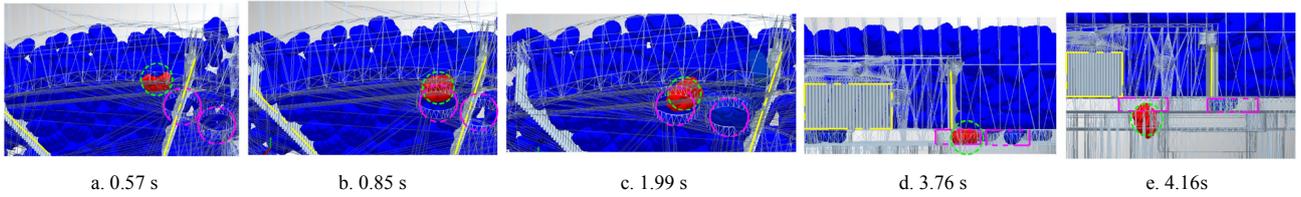
3.2 仿真设置与排种过程

玉米籽粒和排种器的材料和接触参数见表 1 和表 2。设定仿真时间为 2 min，时间步为 1×10^{-6} s。为深入观察水平圆盘式精量排种器中种子模型如何进入穴孔、种刷清种、排种等过程，选择玉米颗粒群中有入型孔动向的籽粒作为观察对象。为了较清楚观察籽粒的运动过程，设置排种器模型以 Mesh 形式显示。

图 6 为水平圆盘式精量排种器正常排种仿真过程。当仿真时间为 0.57 s 时（图 6a）动排种盘一组型孔即将转出种刷架下面的排种区，右种刷阻挡籽粒进入排种区；0.85 s（图 6b）时一个型孔已完全暴露在充种区，在型孔附近有入型孔动向的玉米籽粒在重力、离心力和其他籽粒对其压力的综合作用下，克服其他籽粒和动排种盘对其摩擦力部分进入型孔，此时另一型孔还未转出排种区；随时间的继续，1.99 s（图 6c）时玉米籽粒有一半已进入型孔内；到 3.76 s（图 6d）时籽粒已完全掉入型孔，处于平躺状态，已占据型孔很大空间，其他籽粒无法进入该型孔，随动排种盘转动。该型孔转过左种刷，种刷将型孔上面的籽粒刷出排种区，此时，另一型孔也已充种完毕即将经过左种刷；4.16 s（图 6e）时籽粒随型孔转至定排种盘上的排种口处，玉米籽粒在重力作用下掉入排种管，完成了一次充种、刷种、排种的正常排种完整过程。

3.3 特殊情况

除正常一粒籽粒充填动排种盘型孔外，还有 2 种特殊情况，重播和漏播。如图 7a 所示，重播是型孔充填倾斜的 2 粒籽粒，且经过了富有弹性的种刷（橡胶）到达排种口，落入穴孔内。在实际排种过程中出现重播现象还与玉米籽粒实际尺寸大小不一有关。漏播大致有 2 种：由于籽粒无法克服重力、周围籽粒对其摩擦力和离心力等作用在即将经过种刷时未掉入型孔内，造成第 1 种漏播，如图 7b 所示；另一种漏播是由于籽粒进入型孔的部分较少，在经过种刷时，种刷将其清理出型孔，造成型孔未充种，经过排种区时未有籽粒排出，如图 7c 所示。



注：蓝色为玉米颗粒群；灰色网格状为排种器模型；红色为有入型孔动向的玉米颗粒，并以绿色虚线圆标记；洋红双点划线圆为型孔的位置；黄色点划线或长方形为种刷的位置，下同。

Note: Blue grain is corn particles. Gray grid is model of metering device. Red grain is corn particles having trend into hole, and which is marked with green dotted circular. The position of type holes are marked with magenta double dotted circular. The position of seed brush are marked with yellow dotted line or rectangle. The same as below.

图 6 排种过程仿真

Fig.6 Simulation process of seed metering

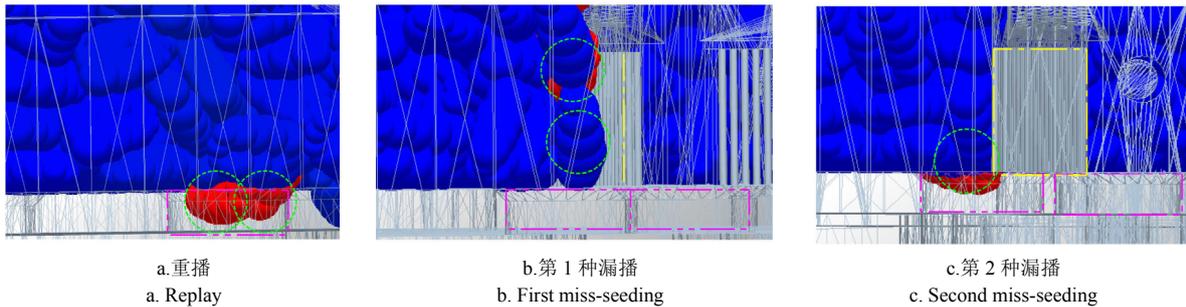


图 7 重播和漏播形成过程

Fig.7 Simulation formation process of replay and miss seeding

3.4 试验因素和指标

参考单粒（精密）播种机试验方法（GB6973-2005）^[26]，选择粒距合格指数 S 、漏播指数 M 和重播指数 D 作为本文仿真试验指标。其计算公式如下：

$$S = \frac{n_1}{N} \times 100\% \quad (1)$$

$$M = \frac{n_0}{N} \times 100\% \quad (2)$$

$$D = \frac{n_2}{N} \times 100\% \quad (3)$$

式中： N 为理论排种数； n_0 为重复排种数； n_1 为单粒排种数； n_2 为漏排种数。

型孔尺寸设计只能容纳 1 粒最大籽粒，且不能容纳同一分级内的 2 粒最小种子。通过玉米尺寸统计确定了玉米仿真模型大致尺寸，并据此确定动排种盘型孔为圆形。由于其大小一致，在排种仿真试验中未将型孔大小和型孔高度作为因素考虑。设计不变的型孔直径为 11 mm，动排种盘厚为 6 mm。

通过改变水平圆盘式精量排种器参数化模型的动排种盘转速（r/min）、动排种盘厚度 δ （mm）和型孔圆角半径（mm）3 个因素进行仿真试验，每个因素都有 3 个水平，其中动排种盘转速参考文献[7]设定，动排种盘厚度根据本文玉米尺寸统计值确定，型孔上面圆角半径取值范围为 1~2 mm。

其因素水平编码表如 4 所示。

表 4 排种器性能试验因素水平编码表
Table 4 Test factor level coding of metering device

水平 Level	因素 Factor		
	动排种盘转速 A Rate of moving seed metering plate/ (r·min ⁻¹)	动排种盘厚度 B Thickness of moving seed metering plate/mm	型孔圆角半径 C Fillet radius of type hole/mm
1	14	5	1
2	17	6	1.5
3	20	7	2

3.5 试验结果

考虑因素间的交互作用，选择正交表 $L_{27}(3^{13})$ 安排试验^[27-28]，试验结果及方差分析见表 5 及表 6。

3.6 结果分析及优化

粒距合格指数越大越好。对粒距合格指数进行的方差分析（表 6）表明，影响粒距合格指 S 的 3 个因素主次顺序为型孔圆角半径 $C >$ 动排种盘转速 $A >$ 动排种盘厚度 B ，且通过分析试验结果（表 5）中 3 个因素的不同水平对粒距合格指数 S 的影响可以得出影响粒距合格指数 S 的较优组合为 $C_1A_2B_2$ 。重播指数和漏播指数越小越好。由表 5、表 6 可知，影响重播指数的 3 个因素主次顺序为动排种盘厚度 $B >$ 动排种盘转速 $A >$ 型孔圆角半径 C ，且影响重播指数的较优组合为 $B_2A_2C_1$ ；影响漏播指数的 3 个因素主次顺序为动排种盘转速 $A >$ 型孔圆角半径 $C >$ 动排种盘厚度 B ，且影响漏播指数的较优组合为 $A_1C_1B_2$ 。

表 5 试验结果
Table 5 Results of testing

序号 Number	因素 Factor									试验评价指标 Test evaluation index		
	A	B	(A×B) ₁	(A×B) ₂	C	(A×C) ₁	(A×C) ₂	(B×C) ₁	(B×C) ₂	S	D	M
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	97.31	2.44	0.25
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	94.64	4.94	0.42
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	92.27	6.84	0.89
4	1	2	2	2	1	1	1	2	3	97.05	2.43	0.52
5	1	2	2	2	2	2	2	3	1	96.16	3.06	0.78
6	1	2	2	2	3	3	3	1	2	96.01	2.76	1.23
7	1	3	3	3	1	1	1	3	2	95.91	2.94	1.15
8	1	3	3	3	2	2	2	1	3	96.36	1.62	2.02
9	1	3	3	3	3	3	3	2	1	91.58	6.30	2.12
10	2	1	2	3	1	2	3	1	1	97.45	2.10	0.45
11	2	1	2	3	2	3	1	2	2	96.54	2.44	1.02
12	2	1	2	3	3	1	2	3	3	95.21	3.16	1.63
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	97.05	1.83	1.12
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	96.38	1.73	1.89
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	96.29	1.70	2.01
16	2	3	1	2	1	2	3	3	2	96.11	1.35	2.54
17	2	3	1	2	2	3	1	1	3	95.25	3.38	1.37
18	2	3	1	2	3	1	2	2	1	93.78	3.12	3.10
19	3	1	3	2	1	3	2	1	1	94.62	4.26	1.12
20	3	1	3	2	2	1	3	2	2	93.28	4.49	2.23
21	3	1	3	2	3	2	1	3	3	89.65	6.25	4.10
22	3	2	1	3	1	3	2	2	3	96.35	1.76	1.89
23	3	2	1	3	2	1	3	3	1	95.26	1.53	3.21
24	3	2	1	3	3	2	1	1	2	94.58	0.59	4.83
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	95.64	2.02	2.34
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	89.23	8.43	2.34
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	91.21	4.66	4.13
<i>K</i> ₁	857.29	850.97	855.55	850.02	867.49	853.32	853.88	857.1	853.75			
<i>S</i> <i>K</i> ₂	864.06	865.13	854.5	851.91	853.1	853.21	859.05	851.48	859			
<i>K</i> ₃	839.82	845.07	851.12	859.24	840.58	854.64	848.24	852.59	848.42			
<i>D</i> <i>K</i> ₁	33.33	36.92	25.95	34.59	21.13	30.24	26.86	27.28	29.2			
<i>K</i> ₂	20.81	17.39	31.06	31.1	31.62	26.4	25.64	31.97	23.23			
<i>K</i> ₃	33.99	33.82	31.12	22.44	35.38	31.49	35.63	28.88	35.7			
<i>M</i> <i>K</i> ₁	9.38	12.11	18.5	15.39	11.38	16.44	19.26	15.62	17.05			
<i>K</i> ₂	15.13	17.48	14.44	16.99	15.28	20.39	15.31	16.55	17.77			
<i>K</i> ₃	26.19	21.11	17.76	18.32	24.04	13.87	16.13	18.53	15.88			

注：A、B、C 为动排种盘转速、动排种盘厚度和型孔圆角半径的编码值；S、M、D 为粒距合格指数、漏播指数和重播指数指标值；K₁、K₂、K₃ 为各水平的和，其值为 $K_i = \sum_{j=1}^{x-1} j_i$ （式中：j=A、B、C、A×B、A×C、B×C；i=1、2、3；x 为组数）。

Note: A, B, C respectively represent coded values of rate of moving seed metering plate, thickness of moving seed metering plate and fillet radius of type hole; S, M, D respectively represent values of seed space, replay and miss-seeding index; K₁, K₂, K₃ respectively represent sum value of each level, which are come from $K_i = \sum_{j=1}^{x-1} j_i$ (Formulas: j = A, B, C, A×B, A×C, B×C; i = 1, 2, 3; x is the number of groups).

表 6 方差分析结果
Table 6 Results of variance analysis

试验指标 Test index	方差来源 Variation source	离差平方和 Standard deviation square SS	自由度 <i>df</i> Degree of freedom	均方差 Mean square MS	F 值 F value	显著性 Sig.
粒距合格指数 S The qualified index of seed space	A	34.763	2	17.382	7.564	*
	B	23.619	2	11.810	5.139	*
	C	40.295	2	20.148	8.768	*
重播指数 D Replay index	A	12.255	2	6.128	2.030	N
	B	24.481	2	12.240	4.055	*
	C	12.120	2	6.060	2.007	N
漏播指数 M Miss-seeding index	A	16.221	2	8.110	37.514	**
	B	4.556	2	2.278	10.537	*
	C	9.342	2	4.671	21.605	**
	AC	2.397	2	1.198	5.543	*

注：“*”表示显著；“**”表示极显著；N表示不显著。
Note: “*” means significant, “**” means very significant, N means not significant.

以合格指数较高为重点、兼顾重播指数和漏播指数较低的原则,确定影响排种质量的主次因素为型孔圆角半径 $C >$ 动排种盘转速 $A >$ 动排种盘厚度 B 。由于3个因素均对粒距合格指 S 影响显著,且其较优水平为 $A_2B_2C_1$,只有动排种盘厚度 B 对重播指数 D 影响显著,且其较优水平为 B_2 ,对其影响不显著因素动排种盘转速 A 和型孔圆角半径 C 的水平取值依据影响粒距合格指 S 的较优水平为 A_2C_1 ,动排种盘转速 A 、型孔圆角半径 C 对漏播指数影响极显著,动排种盘厚度 B 、型孔圆角半径 C 和动排种盘转速 A 的交互项对其影响显著,且其较优水平为 $A_2B_2C_1$,所以选择影响排种质量的较优组合为 $C_1A_2B_2$,即当动排种盘转速为 17 r/min、动排种盘厚度为 6 mm、倒圆角半径为 1 mm 时,粒距合格指数 $S=97.05\%$ 、重播指数 $D=1.83\%$ 、漏播指数 $M=1.12\%$ 。

4 试验验证

为了对仿真试验的优化结果进行验证,2012年6月12号在甘肃洮河拖拉机修造厂旁试验田进行了水平圆盘式精量排种器的田间排种试验。试验田面积 $50\text{ m} \times 15\text{ m}$,地势平坦,南北走向、呈矩形,土壤为黄绵土,地表依照全膜双垄沟播农艺技术要求,经整地起垄后铺膜处理。

玉米种植品种为金穗4号,偏马齿型,种子千粒质量 384 g,种子外形尺寸平均值为 $10.86\text{ mm} \times 7.22\text{ mm} \times 5.12\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高),播种量为 44.6 kg/hm^2 。作业动力采用以常柴牌 R176 型柴油机为依托的小型手扶拖拉机,功率 6.3 kW,整机的前进速度为 0.5 m/s。试验样机采用安装有水平圆盘式精量排种器的玉米全膜双垄沟直插式穴播机,该机能有效解决传统膜上播种机具作业存在挑膜、撕膜、种穴与幼苗错位等问题^[29],玉米全膜双垄沟直插式精量穴播机的主要技术参数如表7所示。试验中,调整水平式精量排种器动排种盘转速为 17 r/min 左右,将动排种盘厚度加工为 6 mm、型孔上边倒圆角半径为 1 mm。

表7 精量穴播机的主要技术参数
Table 7 Main technical parameters of precision seeder

参数 Parameters	数值 Value
配套动力 Motive power/kW	6.3
作业速度 Speed/(m·s ⁻¹)	0.5
外形尺寸(长 \times 宽 \times 高) Dimensions(Length \times width \times height)/mm \times mm \times mm	1700 \times 900 \times 520
播种深度 Sowing depth/mm	30~50
播种株距 Seed space/mm	300/350/400
生产率 Productivity/(hm ² ·h ⁻¹)	0.18

参考单粒(精密)播种机试验方法(GB6973-2005)测定田间试验中的粒距合格指数、重播指数和漏播指数。田间播种试验共进行了9次,对获取的粒距合格指数 S 、重播指数 D 和漏播指数 M 数据取平均,得该排种器田间试验中粒距合格指数 $S=95.13\%$ 、重播指数 $D=2.34\%$ 和漏播指数 $M=2.53\%$,粒距合格指数田间试验与仿真试验误差为 2.02%。由于仿真试验中玉米籽粒模型尺寸统一,而田间试验中玉米籽粒大小虽精心挑选,但形状不一不可避免,这样造成田间试验粒距合格指数低于仿真试验,而重播指数和漏播指数较高。因此,说明水平圆盘式精量排种器仿真试验优化排种性能参数具有可行性。

5 结论

1) 对水平圆盘式精量排种器的仿真试验结果进行方差分析,由方差分析可知,动排种盘转速、动排种盘厚度、型孔圆角半径对重点指标粒距合格指数影响显著;动排种盘厚度对重播指数影响显著;动排种盘转速、型孔圆角半径对漏播指数影响极显著,动排种盘厚度、动排种盘转速和型孔圆角半径交互作用对漏播指数影响显著;

2) 以合格指数较高为重点、兼顾重播指数和漏播指数较低的原则,对仿真结果进行了参数优化,当动排种盘转速为 17 r/min、动排种盘厚度为 6 mm、倒圆角半径为 1 mm 时,粒距合格指数、重播指数和漏播指数较优,分别为 $S=97.05\%$ 、 $D=1.83\%$ 和 $M=1.12\%$ 。

3) 仿真试验与田间试验的重点指标粒距合格指数误差为 2.02% (<5%),证明借助离散单元法优化水平圆盘式精量排种器的排种性能参数是可行的。

[参考文献]

- [1] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [2] Garcia P P. Participatory Development of a Corn Seeder[D]. Philippines: Philippines University, 1993: 119.
- [3] Wang H. Drum Type Seed Metering Device: A Study of Optimum Parameters of Precision Seeding[D]. Philippines: Philippines University, 1991: 104.
- [4] 宋井玲, 杨自栋, 杨善东, 等. 一种型孔深度可变的排种器[J]. 农机化研究, 2010, 32(2): 103-105. Song Jingling, Yang Zidong, Yang Shandong, et al. A seed metering device of variable hole depth[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(12): 103-105. (in Chinese with English abstract)
- [5] 梁天也, 巴晓斌, 时景云, 等. 精播丸粒化玉米种子水

- 平圆盘式排种器清种装置的改进[J]. 吉林农业大学学报, 2001, 23(1): 101—103.
- Liang Tianye, Ba Xiaobin, Shi Jingyun, et al. Improvement on cleaning device of horizontal disc type seeder for pelleted corn seeds[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2001, 23(1): 101—103. (in Chinese with English abstract)
- [6] 廖庆喜, 高焕文. 玉米水平圆盘精密排种器排种性能试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 99—103.
- Liao Qingxi, Gao Huanwen. Experimental study on performance of horizontal disc precision meter for corn seed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(1): 99—103. (in Chinese with English abstract)
- [7] 廖庆喜, 高焕文, 臧英. 玉米水平圆盘精密排种器型孔的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 109—113.
- Liao Qingxi, Gao Huanwen, Zang Ying. Experimental study on the cell of the horizontal plate precision meter for corn seed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(2): 109—113. (in Chinese with English abstract)
- [8] 赵武云, 戴飞, 杨杰, 等. 玉米全膜双垄沟直插式精量穴播机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 91—97.
- Zhao Wuyun, Dai Fei, Yang Jie, et al. Design and experiment of direct insert precision hill seeder with corn whole plastic film mulching on double ridge[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 91—97. (in Chinese with English abstract)
- [9] 赵建托, 赵武云, 任颜华, 等. 玉米全膜覆盖双垄沟播机直插式播种装置设计与仿真[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 40—43.
- Zhao Jiantuo, Zhao Wuyun, Ren Yanhua, et al. Design and simulation of direct insert corn planting device of furrow seeder with whole plastic-film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 40—43. (in Chinese with English abstract)
- [10] 曹文, 丁俊华, 李再臣. 机械式精密排种器的研究与设计[J]. 农机化研究, 2009, 31(7): 142—145.
- Cao Wen, Ding Junhua, Li Zaichen. Research and design of mechanical precision metering[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(7): 142—145. (in Chinese with English abstract)
- [11] 衣淑娟, 陶桂香. 型孔转板式播种器刮种器的设计与试验研究[J/OL]. 中国科技论文在线, 2012: [2014-03-18]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201212-27>.
- [12] 张锋伟, 赵春花, 郭维俊, 等. 基于压痕加载曲线的谷物籽粒硬度性能测定技术[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 128—133.
- Zhang Fengwei, Zhao Chunhua, Guo Weijun, et al. Test of grain hardness based on indentation loading curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 128—133. (in Chinese with English abstract)
- [13] 付宏, 吕游, 李艳双, 等. 基于离散元法的玉米脱粒过程分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2012, 42(4): 997—1002.
- Fu Hong, Lü You, Li Yanshuang, et al. Analysis for corn threshing process based EDM[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2012, 42(4): 997—1002. (in Chinese with English abstract)
- [14] Boac J M, Casada M E, Maghirang R G, et al. Material and interaction properties of selected grains and oil seeds for modeling discrete particles[J]. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2010, 53(4): 1201—1216.
- [15] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京: 农业出版社, 1985.
- [16] 周红. 数字图像处理技术在玉米种子轮廓检测中的应用[J]. 种子, 2004, 23(9): 90—92.
- Zhou Hong. Technology of digital image processing in detecting corn seed contour[J]. Seed, 2004, 23(9): 90—92. (in Chinese with English abstract)
- [17] 赵工, 宋晓明. SolidWorks 设计与应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [18] 石林榕, 赵武云, 吴建民, 等. 切片造型技术在农产品有限元分析中的应用[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(3): 95—98.
- Shi Linrong, Zhao Wuyun, Wu Jianmin, et al. Application of slice modeling technology in finite element analysis of agricultural products[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(3): 95—98. (in Chinese with English abstract)
- [19] 池宁骏, 赵立杉. SOLIDWORKS 2007 产品设计教程[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
- [20] 崔涛, 刘佳, 杨丽, 等. 基于高速摄像的玉米种子滚动摩擦特性试验与仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 34—41.
- Cui Tao, Liu Jia, Yang Li, et al. Experiment and simulation of rolling friction characteristic of corn seed based on high-speed photography[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(15): 34—41. (in Chinese with English abstract)
- [21] Gabriel KP Barriosa, Rodrigo M de Carvalho, Arno Kwadeb, et al. Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling[J]. Powder Technology, 2013, 248(11): 84—93.
- [22] González-Montellano C, Ramírez Á, Gallego E, et al. Validation and experimental calibration of 3D discrete element models for the simulation of the discharge flow in silos[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66 (21): 5116—5126.
- [23] 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.
- [24] 王国强, 郝万军, 王继. 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.
- [25] 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 等. 基于 EDEM 的振动筛分

数值模拟与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 117-121.
Li Hongchang, Li Yaoming, Tang Zhong, et al. Numerical simulation and analysis of vibration screening based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(5): 117-121. (in Chinese with English abstract)

[26] GB/T 6973-2005, 单粒(精密)播种机试验方法[S].
[27] 赵选民. 试验设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
[28] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
[29] 赵武云, 马海军, 吴建民, 等. 全膜覆盖双垄沟播玉米精量穴直播机[P]: 中国专利: 2010206929451, 2012-01-04.

Simulation test for metering process of horizontal disc precision metering device based on discrete element method

Shi Linrong¹, Wu Jianmin¹, Sun Wei¹, Zhang Fengwei¹, Sun Bugong¹, Liu Quanwei², Zhao Wuyun^{1*}

(1. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to optimize the best metering parameters on the performance of horizontal disc precision metering device (The rate of moving metering plate, thickness of moving metering plate, fillet radius of type hole), a simulation model of horizontal disc precision metering device was designed with Solidworks. The average size of Gansu common 3 corn grains were reported in statistics, namely the length is 10.86 mm, and the width is 7.22 mm, and the thickness is 5.12mm. In accordance with which the model of corn grain was designed with the use of slice modeling techniques, and using the spherical particles aggregation method the discrete model of corn grain was established. Poisson's ratio, shear modulus and density of corn were determined by test. Namely poisson's ratio is 0.357, and shear modulus is 2.6 MPa, density is 1 250 kg/m³. To increase the qualified index of seed space and reduce the replay and miss-seeding index, and depress the intensity of field test, on the basis of DEM dynamic simulation metering experiment of horizontal disc precision metering were conducted. Experimental results show: with higher the qualified index of seed space as the key point and taking lower the multi-seed index and the no-seed index into consideration, the bigger the qualified index of seed space is better, and the smaller the multi-seed index and the no-seed index is also better. Variance analysis showed the factor *A*, *B* and *C* had conspicuous effect on the qualified index of the seed space *S*, and the factor *B* had conspicuous effect on the multi-seed index *D*, and the factor *A* and *C* had significant influence on the no-seed index *M*, the factor *B*, interaction between *A* factor and *C* factor had a conspicuous effect on the no-seed index *M*. The speed of the moving metering plate is 17 r/min and the thickness of the moving seed metering plate is 6mm and the fillet radius of the type hole is 1 mm, was selected as an optimal combination. Under the conditions, the qualified index of seed space was 97.05%, and the multi-seed index was 1.83%, and the no-seed index was 1.12%. The optimized parameters of the simulation experiment were verified in the test trial. Field test results showed: under the conditions, the qualified index of the seed space was 95.13%, and the multi-seed index was 2.34%, and the no-seed index was 2.78%. In comparison with the simulation results, the error of the qualified index of the seed space was 2.02%. Therefore, simulation test of the horizontal disc precision metering device has certain guiding significance to develop the performance of the metering parameters device. It provided a reference method for optimizing the other types of precision metering.

Key words: agricultural machinery; numerical methods; optimization; seed metering device; discrete element method

(责任编辑: 张俊芳)