

离心式高速玉米精量排种器 T 形槽型孔设计与试验

杨 丽, 李治民, 张东兴*, 李 川, 崔 涛, 和贤桃

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部土壤-机器-植物系统技术重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 针对离心式高速玉米精量排种器双粒种子并排填充导致重播严重的问题, 该研究提出利用型孔槽对称凸台结构降低玉米种子并排填充概率的方法, 设计了一种 T 形槽型孔。通过构建充种阶段玉米种子的力学模型, 并结合玉米种子的形状特征确定了 T 形槽型孔基本结构参数。借助 EDEM 离散元仿真软件, 以型孔槽前端长度、型孔槽后端面倾斜角以及型孔槽底部倾斜角为因素, 以合格指数、重播指数与漏播指数为评价指标, 设计二次正交旋转回归组合仿真试验。仿真试验结果表明: 在作业速度 18 km/h 条件下, 型孔槽前端长度为 9.31 mm, 型孔槽后端面倾斜角为 43.37°与型孔槽底部倾斜角为 70.5°时, 排种质量最优, 排种合格指数、重播指数与漏播指数分别为 94.03%、1.72% 与 4.25%。台架验证试验结果表明: 作业速度为 15 km/h 时, T 形槽型孔的合格指数最高为 95.16%, 在此作业速度下, 排种器的重播指数为 1.42%, 漏播指数为 3.42%, 满足高速精量播种要求; 作业速度在 12~21 km/h 内时, T 形槽型孔的平均合格指数为 94.77%, 相较于矩形槽型孔提升了 3.13 个百分点, 相较于蹄型槽型孔提升了 1.80 个百分点, T 形槽型孔的平均重播指数为 2.06%, 相较于矩形槽型孔降低了 3.41 个百分点, 相较于蹄型槽型孔降低了 2.49 个百分点。该研究可为离心式高速玉米精量排种器优化提供参考。

关键词: 农业机械; 仿真; 玉米; 高速播种; 型孔; EDEM

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202312208

中图分类号: S223.2⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-07-0050-11

杨丽, 李治民, 张东兴, 等. 离心式高速玉米精量排种器 T 形槽型孔设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(7): 50-60.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202312208 <http://www.tcsae.org>

YANG Li, LI Zhimin, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of the T-shaped hole of centrifugal high-speed maize precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(7): 50-60. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202312208 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

为了满足玉米机械化种植高精度与高效率的要求, 高速精量播种成为了玉米播种装备发展的主要方向^[1]。玉米高速精量播种的重点是播种机在高速作业的条件下能够依据农艺所要求, 将玉米种子按照规定的行距、粒距和深度均匀播到土壤中并可准确定位^[2]。精量玉米排种器作为玉米精量播种机的关键部件, 其排种性能是影响播种质量的重要因素^[3]。玉米精密排种器可分为机械式排种器和气力式排种器, 机械式排种器具有结构简单、成本低和维修方便等优点, 其中广泛应用的有匀轮式^[4]、指夹式^[5-6]和水平圆盘式^[7]等; 气力式排种器具有精度高、通用性强和高速高效等优点, 其中广泛应用的有气吸式^[8-10]、气吹式^[11-12]以及气压式^[13-14]等。当机械式排种器工作速度超过 8 km/h, 气力式排种器工作速度超过 12 km/h 时, 由于玉米种子形状的显著差异, 种群堆积导致的种间摩擦较大, 工作速度提升导致的充种时间减少

等因素制约, 排种器在高速作业时难以保证高质量的排种效果^[15]。因此, 提升排种器在高速条件下的作业性能, 对促进玉米高速精量化播种装备的发展具有重要意义。

为了应对高速工作条件下排种器性能不佳的问题, 刘瑞等^[16]设计了一种双重扰动辅助充种高速气吸式排种器, 通过扩大充种区域以增加充种的时间, 达到降低漏播的目的; 刘艳芳等^[7]设计了一种带倒角的周边式倾斜长方形型孔的水平圆盘排种器, 在提升排种器工作速度的同时, 保证了其良好的排种性能; 丁力等^[17]设计了一种具有辅助充种作用种盘的玉米气吸式高速精量排种器, 该设计采用型孔凸台扰动种群, 降低种间摩擦力, 有效提高了气吸式排种器在高速作业时的合格指数; 高筱钧等^[18]设计了一种气送式高速玉米精量排种器, 该设计利用高速作业时排种盘产生的离心力进行充种与清种, 有效将高速作业的不利条件转化为有利条件; 李川^[19]设计了一种机械供种的离心式排种器, 相对于气送供种装置简化了机构并降低了能耗, 同时采用蹄形槽型孔解决了矩形槽型孔存在的卡种问题。综上所述, 现有研究主要是为了解决排种器在高速作业下充种困难导致的漏播问题, 而对于多颗种子并排填充造成的重播问题未提出适宜的解决方案。

为了降低玉米种子并排充入型孔的概率, 本文设计了一种 T 形槽型孔, 通过型孔槽内部对称布置的凸台限

收稿日期: 2023-12-27 修订日期: 2024-02-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD20000404)

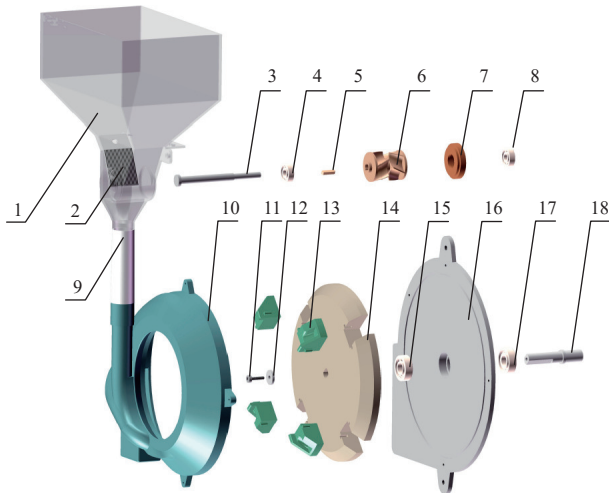
作者简介: 杨丽, 教授, 博士生导师, 研究方向为农业装备智能化和玉米生产全程机械化。Email: yl_hb68@126.com

*通信作者: 张东兴, 教授, 博士生导师, 研究方向为农业装备和玉米生产全程机械化。Email: zhangdx@cau.edu.cn

制并排的双粒种子同时充入型孔，保证单粒充种，进而降低排种器的重播指数，提升排种质量。根据种子的物理特性和充种阶段种子的填充姿态，确定了 T 形槽型孔的基本结构参数，利用离散元仿真试验和响应面优化方法对 T 形槽型孔的关键结构参数进行优化，通过开展台架试验验证仿真试验的可靠性以及 T 形槽型孔降低排种器重播指数的有效性，以期为离心式高速玉米精量排种器优化提供参考。

1 排种器结构与工作原理

离心式高速玉米精量排种器总体结构如图 1 所示，由定量供种装置和排种器主体通过软管连接而成。其中定量供种装置由种箱、毛刷、长轴、第一轴承、键、槽轮、支撑环和第二轴承等部件组成，排种器主体由前壳体、螺丝、垫片、T 形槽型孔、排种盘、第三轴承、后壳体、第四轴承和短轴等部件组成。



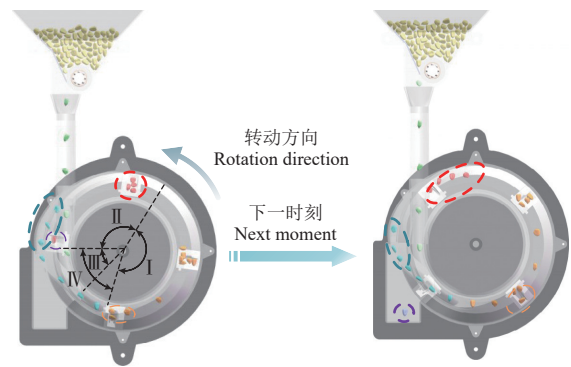
1.种箱 2.毛刷 3.长轴 4.第一轴承 5.平键 6.槽轮 7.支撑环 8.第二轴承 9.软管 10.前壳体 11.螺丝 12.垫片 13.T 形槽型孔 14.排种盘 15.第三轴承 16.后壳体 17.第四轴承 18.短轴
1.Seed box 2.Brush 3.Long shaft 4.First bearing 5.Flat key 6.Grooved wheel 7.Support ring 8.Second bearing 9.Flexible tube 10.Front shell 11.Screw 12.Spacer 13.T-shaped hole 14.Seeding plate 15.Third bearing 16.Rear shell 17.Fourth bearing 18.Short shaft

图 1 离心式高速玉米精量排种器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of centrifugal high-speed maize precision seed metering device

种箱中的种子随着槽轮的转动定量排出，经软管进入排种器内部腔室，依次经历充种阶段 I、清种阶段 II、投种阶段 III 和回流阶段 IV 4 个阶段，如图 2 所示。在充种阶段 I 中，型孔具有较高的旋转速度，而型孔前方的种子运动速度较低，当两者首次接触时，由于两者速度

相差较大，型孔会与种子发生剧烈碰撞，使得种子远离型孔。种子在碰撞后的前进过程中受到摩擦力的作用开始减速。经过一段时间后，型孔与种子再次接触。此时，型孔速度仅略高于种子速度，两者不再发生剧烈碰撞，种子被型孔捕获，与其一起做圆周运动，种子在离心力的作用下充入型孔；在清种阶段 II 中，前壳体的倾斜圆台面上部半径缓慢增大，下部半径保持不变，以保证圆台面仅为型孔底部的种子提供支持力，在这个过程中，任何未充入型孔底部的种子，在离心力的作用下会沿着前壳体的内壁面滑动到回流区域，以保证在清种阶段结束后，型孔内仅容纳单粒种子；在投种阶段 III 中，前壳体内壁面对型孔内种子的支持力消失，种子在离心力的作用下从投种口排出；在回流阶段 IV 中，被清除的回流种子与定量供种装置输送的种子汇聚成种子流，共同用于后续充种。



I. 充种阶段 II. 清种阶段 III. 投种阶段 IV. 回流阶段
I. Seed filling stage II. Seed clearing stage III. Seed discharging stage IV. Returning stage

图 2 离心式高速玉米精量排种器工作原理示意图

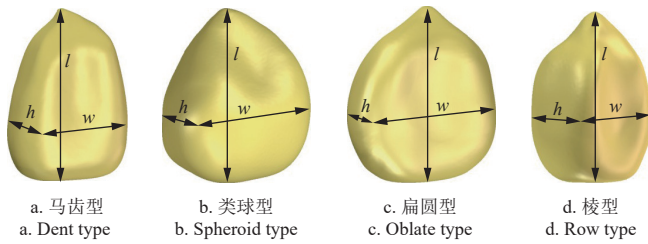
Fig.2 Working principle diagram of centrifugal high-speed maize precision seed metering device

2 玉米种子的形状尺寸

玉米种子的形状尺寸是决定 T 形槽型孔结构的重要因素。本文选取未分级处理的寿禾郑单 958 玉米种子作为试验对象，将 1 000 粒种子按照尺寸特征分为马齿型、类球型、扁圆型和棱型 4 类^[20]，测量每一类种子的三轴尺寸，并计算其平均值，如表 1 所示。在测量的 1 000 粒种子样本中寻找与每类种子平均三轴尺寸相似的种子样本，使用高精度三维激光扫描仪对种子样本进行扫描，将扫描获取的网格文件利用美国 Raindrop 公司的 Geomagic studio 软件进行逆向处理^[21]，得到玉米种子的三维模型，如图 3 所示。

表 1 玉米种子尺寸和分布占比
Table 1 Maize seed size and proportion

| 指标 Index | 马齿型 Dent type | | | 类球型 Spheroid type | | | 扁圆型 Oblate type | | | 棱型 Row type | | |
|------------------------------|---------------|------------|----------------|-------------------|------------|----------------|-----------------|------------|----------------|-------------|------------|----------------|
| | 长 Length | 宽 Width | 厚 Thickness | 长 Length | 宽 Width | 厚 Thickness | 长 Length | 宽 Width | 厚 Thickness | 长 Length | 宽 Width | 厚 Thickness |
| 平均值 Average/mm | 11.73 | 8.88 | 5.12 | 10.07 | 8.69 | 7.27 | 11.34 | 10.17 | 5.40 | 11.70 | 8.39 | 5.96 |
| 标准差 Standard deviation/mm | 0.80 | 0.75 | 0.54 | 1.24 | 1.05 | 1.14 | 1.11 | 0.71 | 0.49 | 0.76 | 0.97 | 0.71 |
| 占比 Proportion/% | 62.8 | | | 17.8 | | | 4.3 | | | 15.1 | | |



注: l 为种子长度, mm; w 为种子宽度, mm; h 为种子厚度, mm
Note: l is seed length, mm; w is seed width, mm; h is seed thickness, mm.

图3 玉米种子模型图
Fig.3 Model diagram of maize seed

3 T形槽型孔结构设计

型孔结构直接决定了排种器的排种质量, 传统的矩形槽型孔和蹄形槽型孔在面对双粒种子侧向并排填充时, 双粒种子会同时充入型孔造成重播, 而 T 形槽型孔因其底部的 T 形结构以及两侧对称布置的凸台, 使得型孔槽呈两侧窄中间宽的形状特征, 当双粒种子同时侧向并排充入时, 凸台会阻碍两侧的种子充入型孔底部, 而由于中间区域侧向空间较大, 种子可以顺利充入型孔底部, 以降低双粒种子并排填充的概率, 实现降低排种器重播的目的, 不同型孔面双粒种子侧向充种的情况如图 4 所示。

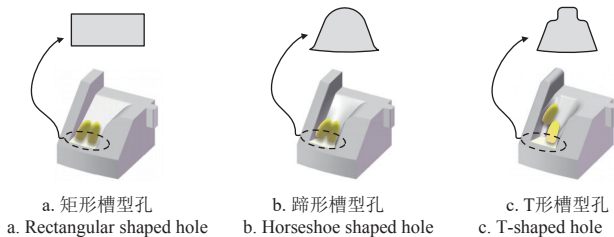


图4 双粒种子侧向充种示意图

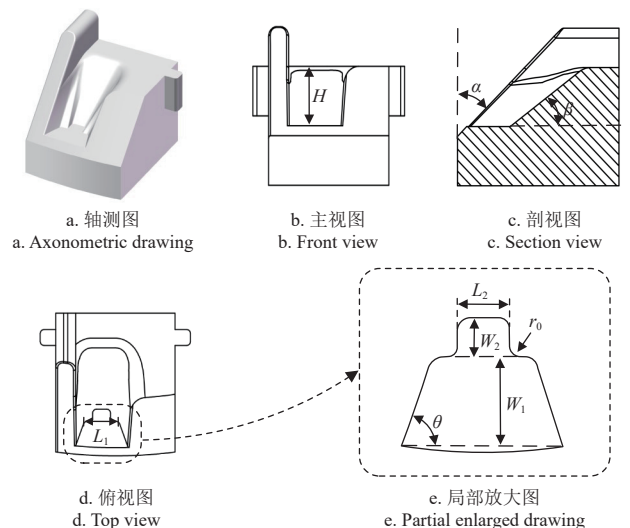
Fig.4 Schematic diagram of lateral filling with double seeds

3.1 型孔槽基本尺寸

T 形槽型孔结构示意图如图 5 所示, 型孔槽的基本尺寸包括型孔槽的深度 H 、前端长度 L_1 、后端长度 L_2 、前端宽度 W_1 、后端宽度 W_2 和底部圆角 r_0 。当上述基本尺寸偏大时, 型孔槽内部空间过大, 容易出现多颗种子同时充入型孔造成重播的情况; 上述基本尺寸偏小时, 则会出现多颗种子卡在型孔槽口或型孔槽中部的情况, 在进入清种阶段后, 这些无法充入型孔槽底部的种子会在离心力的作用下被清出型孔, 导致型孔内将没有种子用于后续投种, 从而产生漏播。

通过分析单粒种子的填充姿态, 可以确定型孔槽基本尺寸范围的最小值。选择数量占比最高的马齿型种子进行研究。种子在填充阶段要经历两个子过程: 被型孔捕获和充入型孔底部达到稳定。对单粒种子进行受力分析, 如图 6 所示。在捕获阶段开始时, 型孔与种子发生碰撞, 种子受到来自型孔给予的支持力 F_N (此处忽略重力影响), 由于种子与型孔的接触点在种子的边缘区域, 支持力的作用点与种子质心之间会存在一定距离, 此时会产生力矩 M_1 , 使种子旋转贴近型孔耳, 型孔完成对种

子的捕获且两者达到共同速度。捕获完成后, 种子在离心力的作用之下, 向前壳体内壁面靠近, 当两者发生接触时, 离心力沿着前壳体壁面方向的分力 F_c^* 使种子向型孔槽底部运动, 同时受到前壳体的支持力 T , 在 T 和 F_c 的共同作用下产生使种子旋转的力矩 M_2 , 在 M_2 的作用下, 种子贴近前壳体达到稳定姿态。根据图 6 可知, 种子达到稳定姿态的条件是期与型孔和前壳体的接触面积之和最大。马齿型、棱型与扁圆型种子的长宽所在面的面积最大, 长厚所在面的面积次之, 与型孔和前壳体接触面面积之和最大的情况相同, 并且三者在整个充种过程中受力相同, 故 3 类种子有相同的充种稳定姿态。类球型种子与上述 3 类种子的充种过程不同, 主要在捕获阶段, 型孔对类球型种子的支持力 F_N 通过其质心或作用点与质心间的距离较小, 这将导致类球型种子在捕获阶段无旋转力矩 M_1 或其值较小, 后续类球型种子充入型孔底部的过程与马齿型类似, 主要依靠离心力沿型孔底部分量 F_c^* 和旋转力矩 M_2 的作用到达型孔底部。



注: H 为型孔槽深度, mm; α 为型孔槽前端面倾斜角, ($^\circ$); β 为型孔槽后端面倾斜角, ($^\circ$); L_1 为型孔槽前端长度, mm; L_2 为型孔槽后端长度, mm; W_1 为型孔槽前端宽度, mm; W_2 为型孔槽后端宽度, mm; θ 为型孔槽底部倾斜角, ($^\circ$); r_0 为型孔槽底部圆角半径, mm。
Note: H is the depth of shaped hole, mm; α is the front inclination angle of shaped hole, ($^\circ$); β is the rear inclination angle of shaped hole, ($^\circ$); L_1 is the length of the front of shaped hole, mm; L_2 is the length of the rear of shaped hole, mm; W_1 is the width of the front of shaped hole, mm; W_2 is the width of the rear of shaped hole, mm; θ is the bottom inclination angle of shaped hole, ($^\circ$); r_0 is the bottom corner radius of shaped hole, mm.

图5 T形槽型孔结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of T-shaped hole

通过分析双粒种子并排填充造成的重播情况, 可以确定型孔槽基本尺寸范围的上限值。基本尺寸值大于此上限值时导致的重播情况如图 7 所示。

根据上述对单粒充种的分析, 将型孔槽底部划分为 3 个区域, 如图 8 所示, 区域 1 和区域 2 用于容纳马齿型、棱型和扁圆型的种子, 区域 3 用于容纳类球型种子。

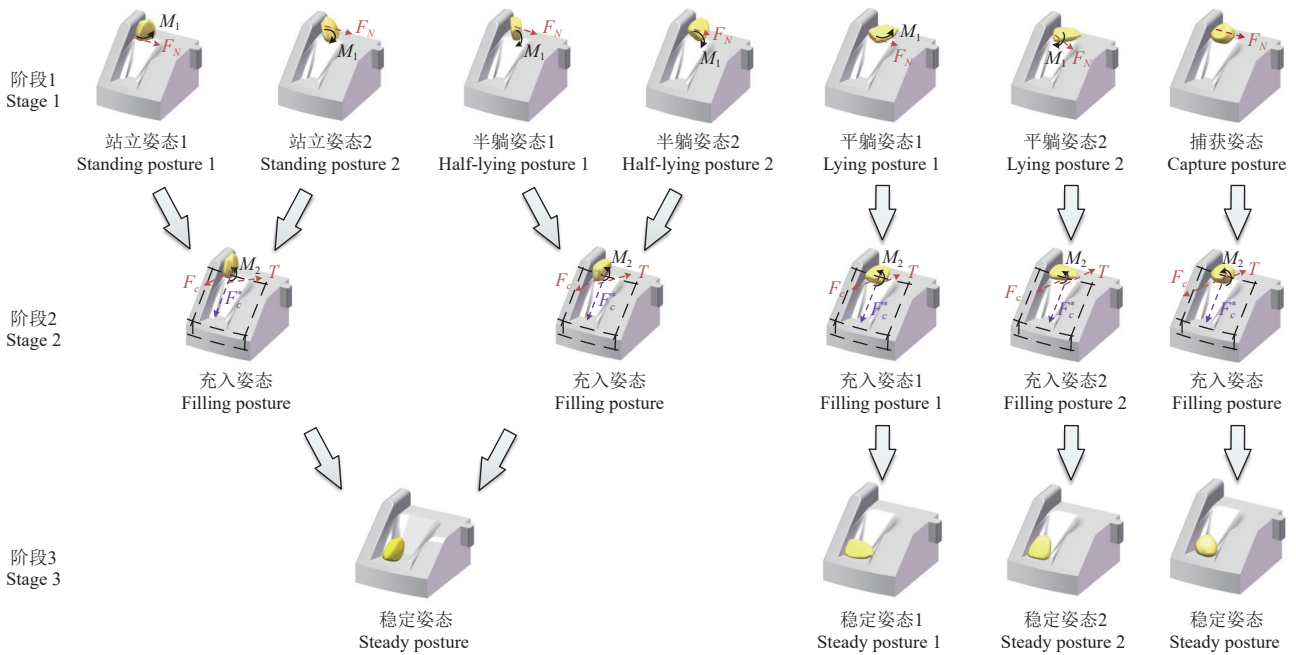
根据区域划分和单粒充种要求, 型孔槽基本尺寸应满足:

$$\begin{cases} t_{\max} - U < W_1 < w_{\min} - U \\ l'_{\max} < L_1 + \frac{2(W_1 + U - w'_{\max})}{\tan\theta} < 2w_{\min} \\ t'_{\max} < L_2 < w_{\min} \\ w_{\max} - U < W_1 + W_2 < 2t_{\min} - U \\ R_0 \cos 45^\circ + R_0 < W_1 + r_0 \cos 45^\circ + U \\ 2R_0 = \sqrt[3]{l_0 w_0 t_0} \end{cases} \quad (1)$$

式中 l'_{\max} 为除去类球型种子的长度均值最大值, mm; w'_{\max} 为除去类球型种子的宽度均值最大值, mm; t'_{\max} 为除去类球型种子的厚度均值最大值, mm; w_{\max} 为种子宽

度均值的最大值, mm; t_{\max} 为种子厚度均值的最大值, mm; w_{\min} 为种子宽度均值的最小值, mm; t_{\min} 为种子厚度均值的最小值, mm; l_0 为类球型种子的平均长度, mm; w_0 为类球型种子的平均宽度, mm; t_0 为类球型种子的平均厚度, mm; R_0 为类球型种子等效半径, mm。

根据表 1 和式 (1), 确定型孔槽后端长度 $L_2=6$ mm, 前端宽度 $W_1=6$ mm, 后端宽度 $W_2=3.2$ mm, 底部圆角半径 $r_0=0.5$ mm, 型孔槽的深度 H 由前壳体清种区域挡板的高度与型孔槽深度共同决定, 为 12 mm。其中型孔槽前端长度 L_1 受型孔槽底部倾角 θ 的影响, 无法通过式 (1) 直接确定, 需结合后续仿真试验确定。



注: F_N 为型孔对种子的支持力, N; F_c 为种子的离心力, N; T 为前壳体对种子的支持力, N; F_c^* 为 F_c 沿前壳体壁面方向的分量, N; M_1 为 F_N 产生的旋转力矩, N·mm; M_2 为 T 和 F_c 产生的旋转力矩, N·mm; 黑色虚线代表前壳体壁面。
Note: F_N is support force of shaped hole to seed, N; F_c is centrifugal force, N; T is support force of front shell to seed, N; F_c^* is component of F_c along front shell wall, N; M_1 is revolving torque generated by F_N , N·mm; M_2 is revolving torque generated by F_c and T , N·mm; The black dashed line represents the front shell wall.

图 6 玉米种子充种姿态
Fig.6 Posture of maize seed filling

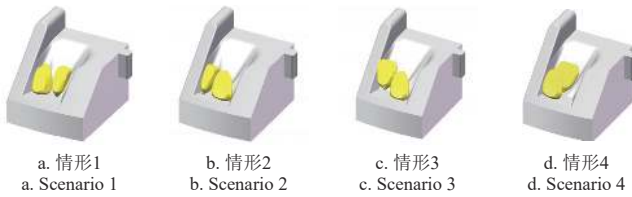


图 7 重播示意图

Fig.7 Schematic diagram of multiple seeding

3.2 型孔槽前端面倾斜角

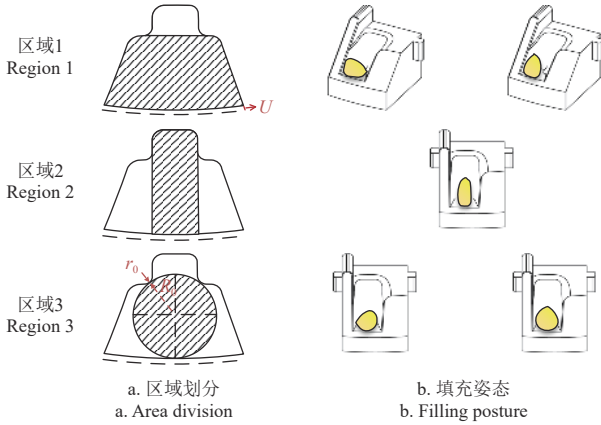
型孔槽的前端面倾斜角 α 会影响种子的填充力和种子到达型孔槽底部的运动距离。为了得到最佳的型孔槽前端面倾斜角 α , 对充种阶段的单粒玉米种子进行受力分析如图 9 所示 (不考虑玉米种子间的相互作用力)。

种子在 x 方向的合力提供了种子充入型孔底部的填充力, 种子在 y 和 j 方向与型孔处于相对静止状态, 由此列写种子的受力平衡方程为

$$\begin{cases} F_e = (F_c + G^*) \sin \alpha - f_1 - f_2 \\ (F_c + G^*) \cos \alpha - T = 0 \\ F_N - G \sin \gamma = 0 \\ F_c = m\omega^2 r \\ f_1 = \mu_1 F_N \\ f_2 = \mu_2 T \\ G^* = G \cos \gamma = mg \cos \gamma \end{cases} \quad (2)$$

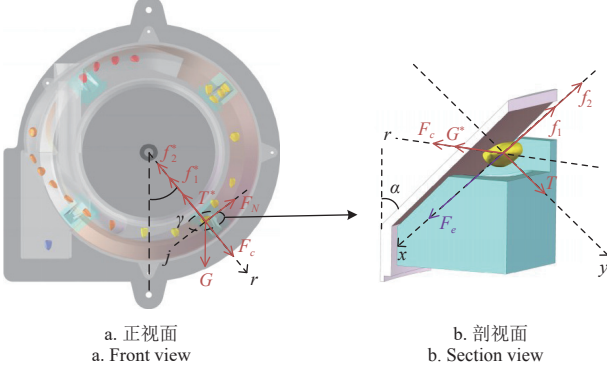
式中 m 为种子的质量, g; ω 为排种器转速, r/min; r 为排种盘半径, mm; γ 为种子所在半径方向与重力方向的夹角, ($^\circ$); g 为重力加速度, mm/s²; μ_1 为型孔与种子间的摩擦系数; μ_2 为型孔与前壳体间的摩擦系数。

种子在填充力的作用之下, 从型孔槽口的 A 点运动到型孔槽底部的 B 点, 如图 10 所示。由于高速作业条件下, 种子的离心力远远大于重力, 可忽略重力的影响, 此时填充力为定值。假设种子在 A 点沿 x 方向的初速度为 0, 种子相对于型孔作匀加速直线运动, 根据刚体匀加速直线运动规律和牛顿第二定律可得:



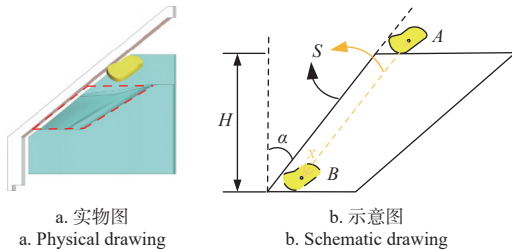
注: R_0 为类球形种子等效直径, mm; U 为型孔与前壳体间隙, mm。
Note: R_0 is the equivalent diameter of the spheroid seed, mm; U is the gap between the shaped hole and front shell.

图 8 型孔底部区域划分
Fig.8 Bottom area division of shaped hole



注: f_1 为型孔对种子的摩擦力, N; f_2 为前壳体对种子的摩擦力, N; G 为种子重力, N; T^* 为前壳体对种子支持力在半径方向的分力, N; f_1^* 为 f_1 在半径 r 方向的分力, N; f_2^* 为 f_2 在半径 r 方向的分力, N; G^* 为 G 在半径 r 方向的分力, N; F_e 为种子受到的合力, N。
Note: f_1 is friction of shaped hole to seed, N; f_2 is friction of front shell to seed, N; G is gravity of seed, N; T^* is the support force component of front shell to seed along radial r , N; f_1^* is component of f_1 along radial r , N; f_2^* is component of f_2 along radial r , N; G^* is component of G along radial r , N; F_e is the combined force on seed.

图 9 充种阶段受力分析
Fig.9 Force analysis of seed filling stage



注: S 为种子从型孔槽顶部运动到底部经过的距离, mm
Note: S is distance of seed traveling from top of shaped hole to bottom, mm.

图 10 充种阶段运动学分析
Fig.10 Kinematic analysis of seed filling stage

$$S = \frac{1}{2}at^2 \quad (3)$$

$$F_e = ma \quad (4)$$

根据图 10 中的几何关系可知:

$$H = S \cos \alpha \quad (5)$$

式中 t 为种子从 A 点运动到 B 点经过的时间, s; a 为种

子的加速度, mm/s^2 ; S 为经过时间 t 种子所运动的距离, mm。

整理式 (2)、式 (5) 得出充种时间为

$$t^2 = \frac{2h}{[\omega^2 r \sin 2\alpha - \mu_2 \omega^2 r (\cos 2\alpha + 1)]/2} \quad (6)$$

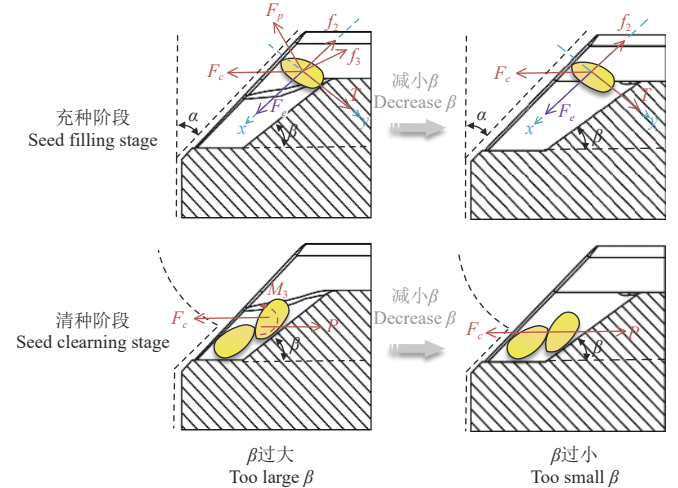
随着 α 的减小, 充种力会随之增大, 但种子充入型孔底部的距离也相应的增大。根据式 (6) 可知, 当种子以最短时间充入型孔底部时, $\alpha=45^\circ$ 。

3.3 型孔槽后端面倾斜角

型孔槽后端面倾斜角 β 会影响型孔槽口的大小, 进而影响型孔容纳种子的能力。随着 β 的增大, 型孔槽空间被压缩, 种子容易与型孔槽的后端面接触。对接触到型孔槽后端面的种子进行受力分析, 如图 11 所示, 可得:

$$\begin{cases} F_e = F_c \cos \alpha - \mu_2 T - F_p \sin(\alpha - \beta) - \\ \mu_1 F_p \cos(\alpha - \beta) \\ T = F_c \sin \alpha - \mu_1 F_p \sin(\alpha - \beta) + F_p \cos(\alpha - \beta) \end{cases} \quad (7)$$

式中 F_p 为型孔槽后端面对种子的支持力, N。



注: P 为前端种子对后端种子的支持力, N; M_3 为 F_c 与 P 产生的翻转力矩, N·mm。

Note: P is the support force of the front-end seed to the back-end seed, N; M_3 is the flipping torque generated by F_c and P , N·mm.

图 11 不同 β 角条件下的充清种分析

Fig.11 Analysis of seed filling and clearing under different β

由式 (7) 可知, F_p 增大会导致种子将难以充入型孔槽底部。当型孔到达清种阶段时, 前壳体挡板无法为未充入型孔底部的种子提供支持力, 在离心力作用之下, 这些种子将脱离型孔, 最终造成漏播。随着 β 减小, 型孔槽上方空间增大, 种子更容易充入型孔槽内部。同时, 由于型孔槽后端空间增大, 更容易出现并排充种, 如图 11 所示。当种子前后并排填充时, 前端种子对后端种子起支撑作用, 当前端种子未覆盖后端种子重心时, 后端种子在 M_3 作用下脱离型孔; 当前端种子覆盖过后端种子重心时, 后端种子受到的支持力 P 将通过种子重心, 此时不产生翻转力矩, 后端种子无法脱离型孔, 最终导致重播问题加剧。

3.4 型孔槽底部倾斜角

为研究 θ 对排种过程的影响, 对投种时刻的种子进

行受力分析如图 12 所示，由图可以得出种子脱离异形型孔的合力满足：

$$F_e = F_c + F_N \cos\theta - \mu_1 F_N \sin\theta \quad (8)$$

传统的矩形槽型孔 θ 为 90° ，当种子尺寸略微大于型孔槽长度时，种子与型孔之间会发生挤压产生微小形变，这时种子所受到的静摩擦将足以抵消其所受到的离心力，种子将卡在型孔槽内，在清种阶段与投种阶段均无法脱离型孔，从而导致了排种器的排种功能失效。当型孔槽底部设置倾斜角 θ 时，会使得种子的挤压变形减小以及脱离型孔的合力增大，减小了型孔卡种的概率。

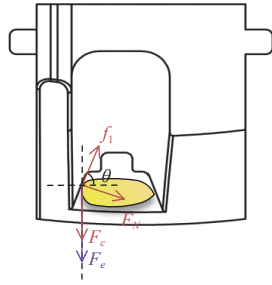


图 12 投种阶段种子受力分析

Fig.12 Seed force analysis in seed discharging stage

4 T 形槽型孔参数优化仿真试验

T 形槽型孔的结构参数是影响排种质量的重要因素，合理的结构参数可以有效提高单粒充种的成功率，提高排种器的合格指数。为了确定 T 形槽型孔的最佳参数，采用离散元分析软件 EDEM 对排种过程进行模拟，分析不同结构参数对排种器合格指数产生的影响。

4.1 仿真模型建立

4.1.1 物理参数设置

为了保证仿真模拟结果的准确性，需要获取排种器和玉米种子的物理参数与接触参数。排种器与种子接触的关键部件中，T 形槽型孔和前壳体的材料为树脂，排种盘的材料为铝合金。种子的物理参数、种子间的接触参数以及种子与排种器的接触参数如表 2 所示^[22-24]。

表 2 仿真模拟参数

Table 2 Numerical simulation parameter

| 项目 Item | 参数 Parameter | 数值 Value |
|---------|--------------------------|----------------------|
| 玉米种子 | 密度/(kg·m ⁻³) | 1 204 |
| | 泊松比 | 0.4 |
| | 剪切模量/Pa | 1.37×10 ⁸ |
| 种子-种子 | 碰撞恢复系数 | 0.233 |
| | 静摩擦因数 | 0.182 |
| | 动摩擦因数 | 0.051 |
| 种子-树脂 | 碰撞恢复系数 | 0.580 |
| | 静摩擦因数 | 0.390 |
| | 动摩擦系数 | 0.036 |
| 种子-铝合金 | 碰撞恢复系数 | 0.880 |
| | 静摩擦因数 | 0.490 |
| | 动摩擦系数 | 0.012 |

4.1.2 玉米颗粒模型建立

选取寿禾郑单 958 玉米种子为建模对象，将三维激光扫描所得到的马齿型、类球型、扁圆型和棱型等四类玉米种子的几何模型用作 EDEM 颗粒填充的模板，得到玉米种子的离散元模型如图 13 所示。

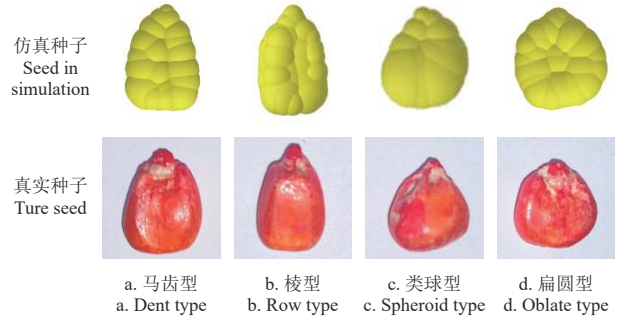


图 13 玉米籽粒仿真模型

Fig.13 Simulation models of maize seed

4.1.3 排种器模型建立

为了提升仿真模拟的效率，对排种器模型进行简化，排种器仿真模型如图 14 所示。

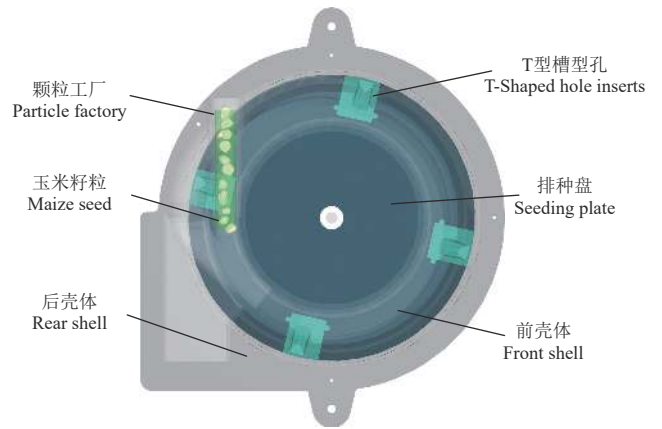


图 14 排种器仿真模型

Fig.14 Simulation model of seed metering device

用颗粒工厂动态生成颗粒的方式替代定量供种装置，大幅减少仿真时的颗粒总数量。在排种过程中，排种器腔室内部的种子数量在 24 颗上下浮动时，排种器的排种性能最佳^[24]。为了将排种器腔室内部的种子数维持在 24 颗，在仿真开始的前 0.5 s 生成 24 颗种子，各旋转部件从 0.5 s 时开始运动，转速设置为 300 r/min，对应排种器的工作速度为 18 km/h。颗粒工厂的种子生成速率与排种器的排种速率保持一致，每秒 20 颗。仿真的接触模型使用 Hertz-mindlin(no-slip) 模型，种子的初始下落速度设置为 0.2 m/s，时间步长设置为 5.88×10^{-7} s，数据保存间隔时间设置为 0.01 s，仿真的总时间设置为 20 s。

4.2 参数优化仿真试验

4.2.1 试验因素与试验指标

型孔槽前端长度 L_1 、型孔槽后端面倾斜角 β 、型孔槽底部倾斜角 θ 是影响 T 形槽型孔充种与投种过程的重要参数，将三者作为响应面优化试验的试验因素。根据 GB/T 6973-2005^[26] 的规定，以合格指数 Y_1 (%)、重播指数 Y_2 (%)、漏播指数 Y_3 (%) 作为试验指标，每组仿真试验测定排种器稳定连续排出的 251 粒种子。

$$Y_1 = \frac{n_1}{N} \times 100\% \quad (9)$$

$$Y_2 = \frac{n_2}{N} \times 100\% \quad (10)$$

$$Y_3 = \frac{n_0}{N} \times 100\% \quad (11)$$

式中 N 为理论排种数; n_1 为单粒播种种数; n_2 为 2 粒以上排种数; n_0 为漏排种子数。

4.2.2 试验方案

根据 T 形槽型孔结构参数对排种影响的理论分析并结合玉米种子的形状尺寸, 选取试验因素的取值范围为: 型孔槽前端长度 L_1 为 8.64 ~ 15.36 mm、型孔槽后端面倾斜角 β 为 41.64° ~ 48.36°、型孔槽底部倾斜角 θ 为 64.59° ~ 81.41°。针对上述关键因素开展三因素五水平二次正交旋转回归组合试验, 试验编码表如表 3 所示。

表 3 试验因素和水平
Table 3 Factors and levels of experiment

| 水平 Levels | 型孔槽前端长度 The length of the front of hole L_1 /mm | 型孔槽后端面倾斜角 The rear inclination angle of hole β (°) | 型孔槽底部倾斜角 The bottom inclination angle of hole θ (°) |
|--------------|---|--|---|
| 1.682 | 15.36 | 48.36 | 81.41 |
| 1 | 14.00 | 47.00 | 78.00 |
| 0 | 12.00 | 45.00 | 73.00 |
| -1 | 10.00 | 43.00 | 68.00 |
| -1.682 | 8.64 | 41.64 | 64.59 |

4.2.3 试验结果与分析

基于 EDEM 的二次正交旋转回归组合试验的试验方案与结果如表 4 所示, 利用 Design-expert 13 软件对试验结果进行回归分析, 试验因素对试验指标的显著性检测结果见表 5。

根据表 5 可知, 合格指数、重播指数以及漏播指数的回归模型均为极显著 ($P \leq 0.01$), 失拟项均不显著 ($P > 0.05$), 表明回归模型的拟合程度较高, 且模型的 R^2 均大于 0.92, 表明模型可以解释评价指标超过 92% 的变化。对于合格指数回归模型, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_1x_2 、 x_1x_3 、 x_1^2 、 x_2^2 与 x_3^2 均为极显著, 其余项均不显著; 对于重播指数回归模型, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_1x_2 、 x_1x_3 、 x_1^2 与 x_2^2 均为极

显著, x_3^2 为显著, 其余项均为不显著; 对于漏播指数回归模型, x_1 、 x_2 、 x_1^2 、 x_2^2 与 x_3^2 均为极显著, x_1x_3 为显著, 其余项均不显著。

剔除回归方程中影响不显著因素的系数, 建立评价指标与试验因素的二次回归方程为

$$\begin{cases} Y_1 = 91.2 - 4.68x_1 - 2.56x_2 + 1.7x_3 + 1.99x_1x_2 + \\ \quad 2.59x_1x_3 - 2.67x_1^2 - 2.82x_2^2 - 2.04x_3^2 \\ Y_2 = 2.24 + 3.11x_1 - 1.04x_2 - 1.16x_3 - x_1x_2 - \\ \quad 1.19x_1x_3 + 1.51x_1^2 + 0.66x_2^2 + 0.52x_3^2 \\ Y_3 = 6.56 + 1.57x_1 + 3.61x_2 - 1.4x_1x_3 + \\ \quad 1.17x_1^2 + 2.15x_2^2 + 1.52x_3^2 \end{cases} \quad (12)$$

表 4 试验方案及试验结果
Table 4 Experimental design and result

| 序号 No. | x_1 | x_2 | x_3 | 合格指数 Qualified index Y_1 /% | 重播指数 Multiple index Y_2 /% | 漏播指数 Leakage index Y_3 /% |
|-----------|----------|----------|----------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | -1 | -1 | -1 | 91.63 | 2.39 | 5.98 |
| 2 | 1 | -1 | -1 | 72.51 | 13.14 | 14.35 |
| 3 | -1 | 1 | -1 | 85.26 | 1.59 | 13.15 |
| 4 | 1 | 1 | -1 | 74.1 | 9.16 | 16.74 |
| 5 | -1 | -1 | 1 | 92.43 | 1.59 | 5.98 |
| 6 | 1 | -1 | 1 | 83.67 | 8.36 | 7.97 |
| 7 | -1 | 1 | 1 | 84.06 | 1.59 | 14.35 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 83.26 | 3.59 | 13.15 |
| 9 | -1.682 8 | 0 | 0 | 91.24 | 1.59 | 7.17 |
| 10 | 1.682 8 | 0 | 0 | 76.9 | 10.75 | 12.35 |
| 11 | 0 | -1.682 8 | 0 | 90.04 | 5.18 | 4.78 |
| 12 | 0 | 1.682 8 | 0 | 77.29 | 2.39 | 20.32 |
| 13 | 0 | 0 | -1.682 8 | 84.86 | 4.78 | 10.36 |
| 14 | 0 | 0 | 1.682 8 | 86.85 | 1.99 | 11.16 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 90.43 | 2.79 | 6.78 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 92.03 | 1.59 | 6.38 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 90.83 | 2.39 | 6.78 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 89.6 | 1.99 | 8.41 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 92.03 | 3.19 | 4.78 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 92.83 | 1.59 | 5.58 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 88.84 | 2.79 | 8.37 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 92.43 | 2.39 | 5.18 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 91.63 | 1.59 | 6.78 |

注: x_1 、 x_2 、 x_3 分别为 L_1 、 β 和 θ 的水平值。
Note: x_1 , x_2 and x_3 are the level values of L_1 , β and θ .

表 5 模型方差分析

Table 5 Variance analysis of model

| 方差来源 Source | 合格指数 Qualified index | | | | 重播指数 Multiple index | | | | 漏播指数 Leakage index | | | |
|----------------|--------------------------|-----------------------------|-------|------------|--------------------------|-----------------------------|--------|------------|--------------------------|-----------------------------|-------|------------|
| | 平方和 Sum of squares | 自由度 Degree of freedom | F | P | 平方和 Sum of squares | 自由度 Degree of freedom | F | P | 平方和 Sum of squares | 自由度 Degree of freedom | F | P |
| 模型 Model | 817.91 | 9 | 26.47 | <0.000 1** | 231.75 | 9 | 45.95 | <0.000 1** | 371.06 | 9 | 18.39 | <0.000 1** |
| x_1 | 299.52 | 1 | 87.23 | <0.000 1** | 132.23 | 1 | 235.95 | <0.000 1** | 33.73 | 1 | 15.04 | 0.001 9** |
| x_2 | 89.71 | 1 | 26.13 | 0.000 2** | 14.85 | 1 | 26.50 | 0.000 2** | 177.57 | 1 | 79.19 | <0.000 1** |
| x_3 | 39.64 | 1 | 11.54 | 0.004 8** | 18.38 | 1 | 32.79 | <0.000 1** | 4.04 | 1 | 1.80 | 0.202 7 |
| x_1x_2 | 31.68 | 1 | 9.23 | 0.009 5** | 7.90 | 1 | 14.10 | 0.002 4** | 7.94 | 1 | 3.54 | 0.082 5 |
| x_1x_3 | 53.66 | 1 | 15.63 | 0.001 7** | 11.40 | 1 | 20.34 | 0.000 6** | 15.60 | 1 | 6.95 | 0.020 5* |
| x_2x_3 | 2.00 | 1 | 0.58 | 0.459 0 | 0.00 | 1 | 0.00 | 0.996 3 | 1.99 | 1 | 0.89 | 0.363 4 |
| x_1^2 | 113.51 | 1 | 33.06 | <0.000 1** | 36.1 | 1 | 64.42 | <0.000 1** | 21.58 | 1 | 9.63 | 0.008 4** |
| x_2^2 | 126.00 | 1 | 36.70 | <0.000 1** | 7.01 | 1 | 12.50 | 0.003 7** | 73.58 | 1 | 32.81 | <0.000 1** |
| x_3^2 | 66.24 | 1 | 19.29 | 0.000 7** | 4.34 | 1 | 7.75 | 0.015 5* | 36.67 | 1 | 16.35 | 0.001 4** |
| 残差 Residual | 44.64 | 13 | | | 7.29 | 13 | | | 29.15 | 13 | | |
| 失拟 Lack of fit | 30.05 | 5 | 3.30 | 0.065 5 | 4.41 | 5 | 2.45 | 0.125 | 16.24 | 5 | 2.01 | 0.180 9 |
| 误差 Pure error | 14.59 | 8 | | | 2.88 | 8 | | | 12.91 | 8 | | |
| 总和 Total | 862.55 | 22 | | | 239.03 | 22 | | | 400.21 | 22 | | |

注: **表示影响极显著 ($P \leq 0.01$); *表示影响显著 ($0.01 < P < 0.05$)。

Note: ** means highly significant ($P \leq 0.01$); * means significant ($0.01 < P < 0.05$).

为了探究试验因素对各指标的影响, 分析仿真过程中的重漏播情况, 结果如图 15 所示; 利用 Design expert

13 软件绘制试验因素交互作用显著的响应曲面, 如图 16 所示。

观察仿真模拟中玉米籽粒的运动规律并结合响应曲面可知：随着型孔槽前端长度、型孔槽后端倾斜角与型孔槽底部倾斜角的增大，合格指数先增大后减小，重播指数先减小后增大；随着型孔槽前端长度与型孔槽底部倾斜角的增大，漏播指数先减小后增大。这是因为：随着型孔槽前端长度与型孔槽底部倾斜角增大，型孔槽长度增加，种子更易充入型孔，因此合格指数增大，漏播指数降低。当长度尺寸增大到能够容纳 2 粒种子时，双

粒种子并排填充的概率增加，重播问题加剧，排种器内的种子数减少，易发生型孔取不到种子的情况，最终导致重播与漏播指数增加，合格指数降低。随着型孔槽后端面倾斜角增大，型孔槽口扩大，种子不易与型孔槽后端面接触，充种摩擦力减小，种子更易充入型孔，导致合格指数上升，漏播指数降低。当型孔槽后端面倾斜角过大时，双粒种子并排填充的概率也随之增大，最终也将导致合格指数降低，重播与漏播指数增加。

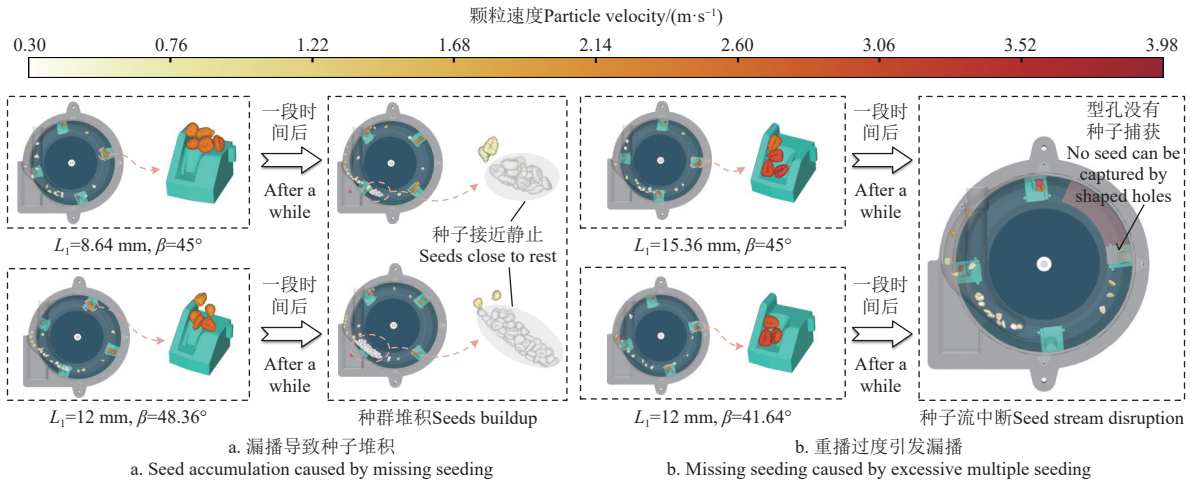


图 15 排种过程重漏播仿真分析
 Fig.15 Simulation analysis of multiple and leakage seeding during seed discharging

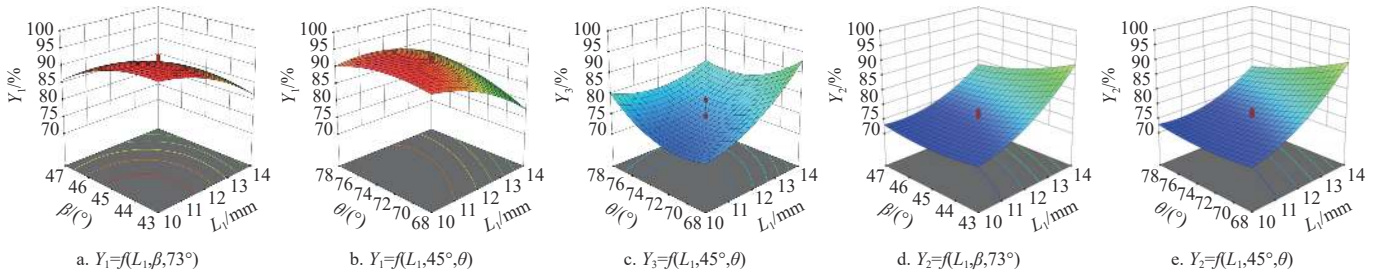


图 16 因素间交互作用对排种性能影响的响应面
 Fig.16 Response surfaces of influence of interaction between factors on seeding performance

为得到 T 形槽型孔最优结构参数，以合格指数最大、重播与漏播指数最小为目标进行优化求解。优化目标函数为

$$\begin{cases} \max Y_1(L_1, \beta, \theta) \\ \min Y_2(L_1, \beta, \theta) \\ \min Y_3(L_1, \beta, \theta) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 8.64 \text{ mm} \leq L_1 \leq 15.36 \text{ mm} \\ 41.64^\circ \leq \beta \leq 48.36^\circ \\ 64.59^\circ \leq \theta \leq 81.41^\circ \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

求解得出型孔槽前端长度为 9.31 mm，型孔槽后端面倾斜角为 43.37°，型孔槽底部倾斜角为 70.5°时，排种质量最优，此时排种合格指数、重播指数与漏播指数分别为 95.44%、0.9% 与 4.48%。为验证优化结果的准确性，在相同条件下进行 3 组仿真试验，结果取平均值，得到排种器的合格指数、重播指数与漏播指数分别为 94.03%、1.72% 与 4.25%，接近预测值，说明二次正交旋转回归组合试验的优化结果准确。

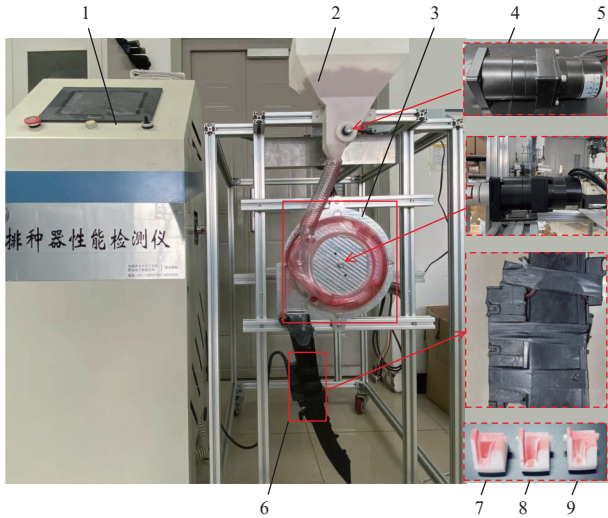
5 台架性能验证试验

5.1 试验材料与装置

为了验证仿真试验的可靠性以及 T 形槽型孔减小重播指数的有效性，开展台架性能验证试验，试验台架如图 17 所示。

试验种子选用未分级的寿禾郑单 958 玉米杂交种，千粒质量 366 g，含水率 11.99%，休止角 19.7°；试验使用的排种器为离心式高速玉米精量排种器，主要零部件通过光固化 3D 打印技术加工而成，材料为未来 R4600 树脂，其余零部件使用铝合金机加工；排种器通过直流无刷电机配合减速器进行驱动，电机额定转矩为 0.18 N·m，额定转速为 3 000 r/min。驱动定量供种装置的电机配备有 1:30 二级减速器，驱动排种器的电机配备有 1:10 单级减速器，通过减速增扭作用使电机能够稳定驱动排种器；试验检测装置使用中国农业大学自主研发的检测仪，当种子通过落种管中部的光电传感器时，传

传感器发送脉冲信号给 PLC, PLC 在相邻脉冲中统计定时中断产生的次数, 得到设定粒距区段内的种子个数, 最终计算出排种合格指数、重播指数、漏播指数等^[25]。



1. 排种器性能检测仪 2. 定量供种装置 3. 排种器 4. 齿轮减速器 5. 直流无刷电机 6. 光电传感器 7. 矩形槽型孔 8. 蹄形槽型孔 9. T形槽型孔
1. Performance detection device of seed metering device 2. Quantitative seed feeding device 3. Seed metering device 4. Gear speed reducer 5. Brushless direct current motor 6. Optical transducer 7. Rectangular shaped hole 8. Horseshoe shaped hole 9. T-shaped hole

图 17 试验台架

Fig.17 Test bench

5.2 试验方案

试验因素水平如表 6 所示。试验根据 GB/T 6973-2005《单粒(精密)播种机试验方法》^[26]实施, 将 500 颗稳定连续排出的种子记为一组, 每组试验重复 5 次, 取平均值作为最终试验结果。

表 6 试验因素水平

Table 6 Factors and levels of test

| 水平 Level | 型孔类型 Type of shaped hole | 作业速度 Working speed/(km·h ⁻¹) |
|-------------|-----------------------------|---|
| 1 | 矩形 | 12 |
| 2 | 蹄形 | 15 |
| 3 | T形 | 18 |
| 4 | | 21 |

5.3 试验结果分析

台架试验结果如表 7 所示, 根据表 7 可知, 机具作业速度为 18 km/h 时, T 形槽型孔的排种器的合格指数为 94.54%, 与仿真试验结果基本吻合, 两者相对误差为 0.54%, 产生误差的主要原因: 仿真模拟的玉米籽粒模型与真实籽粒形状存在差异以及颗粒工厂动态生成颗粒的方式无法体现定量供种装置存在的供种脉动性。作业速度为 12~21 km/h 时, T 形槽型孔的合格指数不低于 94.36%, 重播指数不高于 3.26%, 漏播指数不高于 3.60%, T 形槽型孔的平均合格指数为 94.77%, 相较于矩形槽型孔提升了 3.13 个百分点, 相较于蹄形槽型孔提升了 1.80 个百分点, T 形槽型孔的平均重播指数为 2.06%, 相较于矩形槽型孔降低了 3.41 个百分点, 相较于蹄形槽型孔降低了 2.49 个百分点。对比不同作业速度的试验结果可知, 排种器的合格指数随着工作速度的增大出现先增后降的趋势, 作业速度为 15 km/h 时, 合格指数最高, 为 95.16%。

产生上述趋势的原因: 充种力随工作速度的增大而增大, 故在一定范围内排种器速度的增大将有利于充种, 但当工作速度超过最佳值时, 工作速度增大导致的充种时间减少与供种脉动性增强等问题对排种质量产生的不利影响大于充种力增大产生的有利影响, 此时排种合格指数开始降低。

表 7 试验结果

Table 7 Results of experiment

| 型孔类型 Type of shaped hole | 工作速度 Working speed/(km·h ⁻¹) | 合格指数 Qualified index/% | 重播指数 Multiple index/% | 漏播指数 Leakage index/% |
|-----------------------------|---|---------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 矩形 Rectangular | 12 | 90.96 | 6.62 | 2.42 |
| | 15 | 92.78 | 3.94 | 3.28 |
| | 18 | 91.62 | 5.90 | 2.48 |
| | 21 | 91.22 | 5.38 | 3.40 |
| 蹄形 Horseshoe | 12 | 93.58 | 3.64 | 2.78 |
| | 15 | 93.72 | 3.52 | 2.76 |
| | 18 | 92.88 | 4.34 | 2.78 |
| | 21 | 91.72 | 6.68 | 1.60 |
| T形 T-shaped | 12 | 95.02 | 1.38 | 3.60 |
| | 15 | 95.16 | 1.42 | 3.42 |
| | 18 | 94.54 | 2.16 | 3.30 |
| | 21 | 94.36 | 3.26 | 2.38 |

6 结论

1) 本文针对现有离心式高速玉米精量播种器重播指数较高的问题, 设计了一种 T 形槽型孔, 通过型孔槽两侧对称凸台阻碍双粒并排充种, 提高单粒充种的成功率, 结合种子尺寸分布与种子填充姿态对 T 形槽型孔基本结构参数进行设计, 确定型孔槽后端长度为 6 mm、前端宽度为 6 mm、后端宽度为 3.2 mm、底部圆角半径为 0.5 mm, 型孔槽的深度为 12 mm。

2) 通过 T 形槽型孔结构参数对排种器性能影响的理论分析确定影响排种质量的关键参数为型孔槽前端长度、型孔槽后端面倾斜角以及型孔槽底部倾斜角。使用离散元仿真软件 EDEM 进行响应面优化试验。结果表明, 在作业速度 18 km/h 条件下, 型孔槽前端长度取 9.31 mm, 型孔槽后端面倾斜角取 43.37°, 型孔槽底部倾斜角取 70.5°时, 排种器的播种质量最优, 此时排种合格指数、重播指数与漏播指数分别为 95.44%、0.9% 与 4.48%, 仿真试验的合格指数、重播指数与漏播指数分别为 94.03%、1.72% 与 4.25%, 响应面优化结果具有较高的准确性。

3) 台架验证试验的结果表明, 在作业速度为 18 km/h 时, 安装 T 形槽型孔的高速离心式排种器合格指数为 94.54%, 与仿真试验结果基本吻合, 两者相对误差为 0.54%, 证明仿真试验结果可靠; 作业速度为 15 km/h 时, T 形槽型孔的合格指数最高为 95.16%, 在此作业速度下, 排种器的重播指数为 1.42%, 漏播指数为 3.42%, 满足高速精量播种要求; 作业速度在 12~21 km/h 内时, T 形槽型孔的平均合格指数为 94.77%, 相较于矩形槽型孔提升了 3.13 个百分点, 相较于蹄形槽型孔提升了 1.80 个百分点, T 形槽型孔的平均重播指数为 2.06%, 相较于矩形槽型孔降低了 3.41 个百分点, 相较于蹄形槽型孔降低了 2.49 个百分点。T 形槽型孔能够有效降低重播指数, 提高排种器的播种质量。

[参 考 文 献]

- [1] 梁玉成, 孙士明, 谢宇峰, 等. 我国玉米播种机现状及发展趋势[J]. *农机化研究*, 2022, 44(12): 265-268.
LIANG Yucheng, SUN Shiming, XIE Yufeng, et al. Present situation and development trend of corn seeder in China[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2022, 44(12): 265-268. (in Chinese with English abstract)
- [2] 杨丽, 颜丙新, 张东兴, 等. 玉米精密播种技术研究进展[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(11): 38-48.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(11): 38-48. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李玉环, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米高速精量排种器直线投种过程分析与试验[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(9): 26-35.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Analysis and test of linear seeding process of maize high speed precision metering device with air suction[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(9): 26-35. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李鑫, 籍俊杰, 曹少波, 等. 勺轮式玉米精密排种器设计与参数分析[J]. *农机化研究*, 2018, 40(3): 13-16.
LI Xin, JI Junjie, CAO Shaobo, et al. Design and parameter analysis of spoon wheel corn[J]. *Agricultural Mechanization Research*, 2018, 40(3): 13-16. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王金武, 唐汉, 王金峰, 等. 指夹式玉米精量排种器导种投送运移机理分析与试验[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(1): 29-37, 46.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Analysis and experiment of guiding and dropping migratory mechanism on pickup finger precision seed metering device for corn[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(1): 29-37, 46. (in Chinese with English abstract)
- [6] 耿端阳, 李玉环, 孟鹏祥, 等. 玉米伸缩指夹式排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5): 38-45.
GENG Duanyang, LI Yuhuan, MENG Pengxiang, et al. Design and test on telescopic clip finger type of metering device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5): 38-45. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘艳芬, 林静, 李宝筏, 等. 玉米播种机水平圆盘排种器型孔设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 37-46.
LIU Yanfen, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and experiment of horizontal disc seed metering device for maize seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(8): 37-46. (in Chinese with English abstract)
- [8] 丁力, 杨丽, 武德浩, 等. 基于DEM-CFD耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(11): 48-57.
DING Li, YANG Li, WU Dehao, et al. Simulation and experiment of corn air suction seed metering device based on DEM-CFD coupling method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(11): 48-57. (in Chinese with English abstract)
- [9] LI J H, LAI Q H, ZHANG H, et al. Suction force on high-sphericity seeds in an air-suction seed-metering device[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 211: 125-140.
- [10] REN S H, YI S J. Control mechanism and experimental study on electric drive seed metering device of air suction seeder[J]. *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, 2022, 29(4): 1254-1261.
- [11] 韩丹丹. 内充气吹式玉米精量排种器仿真优化与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
HAN Dandan. Optimization Simulation and Experimental Research of Inside-filling Air-blowing Maize Precision Seed-metering Device[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [12] TANG H, XU F D, XU C S, et al. The influence of a seed drop tube of the inside-filling air-blowing precision seed-metering device on seeding quality[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 204: 1-14.
- [13] 史嵩. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
SHI Song. Design and Experimental Research of the Pneumatic Maize Precision Seed-metering Device with Combined Holes[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [14] 高宏杰. 玉米-大豆通用精密排种器设计与试验研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2022.
GAO Hongjie. Design and Experiment Study of General Precision Seed Metering Device for Corn and Soybean[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [15] 高筱钧, 徐杨, 张东兴, 等. 气送式高速玉米精量排种器设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(23): 9-20.
GAO Xiaojun, XU Yang, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of air-assisted high speed precision maize seed metering device[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(23): 9-20. (in Chinese with English abstract)
- [16] 刘瑞, 刘忠军, 刘立晶, 等. 玉米扰动辅助充种高速气吸式排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(9): 50-59.
LIU Rui, LIU Zhongjun, LIU Lijing, et al. Design and experiment of corn high speed air suction seed metering device with disturbance assisted seed-filling[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(9): 50-59. (in Chinese with English abstract)
- [17] 丁力, 杨丽, 刘守荣, 等. 辅助充种种盘玉米气吸式高速精量排种器设计[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(22): 1-11.
DING Li, YANG Li, LIU Shourong, et al. Design of air suction high speed precision maize seed metering device with assistant seed filling plate[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(22): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [18] 高筱钧, 徐杨, 贺小伟, 等. 气送式高速玉米精量排种器导流涡轮设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(11): 42-52.
GAO Xiaojun, XU Yang, HE Xiaowei, et al. Design and experiment of diversion turbine of air-assisted high speed maize precision seed metering device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(11): 42-52. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李川. 一种机械供种的离心式玉米高速精量排种器: 202211373974.5[P]. 2023-01-03.

- [20] 张昆, 衣淑娟. 气吸滚筒式玉米排种器充种性能仿真与试验优化[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(7): 78-86.
ZHANG Kun, YI Shujuan. Simulation and experimental optimization on filling seeds performance of seed metering device with roller of air-suction[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(7): 78-86. (in Chinese with English abstract)
- [21] 孙舒畅. 基于 DEM-CFD 耦合的气吸式玉米精密排种器工作过程仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
SUN Shuchang. Simulation Analysis of Working Process of Air Suction Corn Precision Seed-metering Device Based on DEM-CFD Coupling Method[D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(22): 36-42.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(22): 36-42. (in Chinese with English abstract)
- [23] 韩丹丹, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM-CFD 耦合的内充气吹式排种器优化与试验[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(11): 43-51.
HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Optimization and experiment of inside-filling air-blowing seed metering device based on EDEM-CFD[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11): 43-51. (in Chinese with English abstract)
- [24] GAO X J, CUI T, ZHOU Z Y, et al. DEM study of particle motion in novel high-speed seed metering device[J]. *Advanced Powder Technology*, 2021, 32(5): 1438-1449.
- [25] 和贤桃, 郝永亮, 赵东岳, 等. 玉米精量排种器排种质量自动检测仪设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(10): 19-27.
HE Xiantao, HAO Yongliang, ZHAO Dongyue, et al. Design and experiment of testing instrument for maize precision seed meter's performance detection[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(10): 19-27. (in Chinese with English abstract)
- [26] 全国农业机械标准化技术委员会. 单粒(精密)播种机试验方法: GB/6973-2005 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

Design and test of the T-shaped hole of centrifugal high-speed maize precision seed metering device

YANG Li, LI Zhimin, ZHANG Dongxing^{*}, LI Chuan, CUI Tao, HE Xiantao

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Soil-Machine-Plant System Technology of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

Abstract: Agricultural production has been dominated by mechanization in recent years. High-speed precision seeding can fully meet the requirements of high-efficiency mechanized planting. There is a high demand for the stable and excellent operational performance of the precision seed metering device. In this study, a T-shaped hole was designed to update the existing centrifugal maize precision seed metering multiple seeding. The hole-shaped symmetric tab structure was also proposed to reduce the probability of maize seed side-by-side filling. A systematic analysis was made to clarify the influence of the structural parameters in a T-shaped hole on the process of sowing. The size of the maize seed was combined to determine the values of some structural parameters of a T-shaped hole. The range of the factors was selected for the subsequent orthogonal tests. Specifically, the length of the front, the rear inclination angle, and the inclination angle of the bottom inclination angle were from 8.64 to 15.36 mm, 41.64° to 48.36°, and 64.59° to 81.41°, respectively. A three-factor three-level quadratic orthogonal rotational regression test was conducted on EDEM software using the structural parameters as test factors, while the qualified, multiple and leakage indexes as evaluation indexes. ANOVA and response surface optimization were then performed on Design Expert 13 software. A combination of optimal structural parameters was achieved in the T-shaped hole: the length of the front was 9.31 mm, the rear inclination angle was 43.37°, and the inclination angle of the bottom inclination angle was 70.5°. The predicted qualified, multiple and leakage indexes were 95.44%, 0.9% and 4.48%, respectively. Three groups of simulations were carried out to verify the optimization under the same conditions. At the same time, the qualified, multiple and leakage index of seed metering device were 94.03%, 1.72% and 4.25%, respectively. There was close to the predicted value, indicating the accurate optimization of quadratic orthogonal rotary regression. A bench test was carried out to verify the reliability of the simulation and the effectiveness of T-shaped hole, in terms of reducing multiple indexes. The qualified index of the seed metering device was 94.54% when the operating speed was 18 km/h. The relative error with the simulation was 0.54%, indicating the reliability of simulation optimization. When the working speed is 12~21 km/h, the qualified index of T-shaped hole is not less than 94.36%, the multiple index is not higher than 3.26%, and the leakage index is not higher than 3.60%, and the average qualified index of T-shaped hole is 94.77%, which is improved by 3.13 percentage points compared with rectangular shaped hole, and 1.80 percentage points compared with horseshoe shaped hole; the average multiple index of T-shaped hole was 2.06%, a decrease of 3.41 percentage points compared to rectangular shaped holes and a decrease of 2.49 percentage points compared to horseshoe shaped hole.

Keywords: agriculture machinery; simulation; maize; high speed seeding; shaped hole; EDEM