doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.016

丘坡地水平圆盘式玉米精量排种器设计与试验

和贤桃[1,2]　齐浩君[1]　张东兴[1,2]　杨　丽[1,2]　崔　涛[1,2]　张凯良[1,2]　桑兴超[1]

(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: 为提高排种器在大坡度倾斜工况下的播种质量,设计了一种丘坡地水平圆盘式玉米精量排种器。通过分析影响水平圆盘式排种器性能的因素,设计了异端面斜向型孔和环形分区壳体,并确定了其关键结构参数;设计了排种盘双侧充种斜面以提高种子群流动性和充种性能。以型孔小端面直径、导种斜面倾角、排种盘转速为试验因素,以合格指数、漏播指数和重播指数为评价指标,开展二次正交旋转回归组合试验并进行参数优化,结果表明:当小端面直径为 11.25 mm、导种斜面倾角为 57.43°、排种盘转速为 10.56 r/min 时,合格指数为 94.77%、漏播指数为 1.47%、重播指数为 3.86%,满足玉米精量播种要求。在优化参数下进行了排种器倾斜工况性能试验(倾斜方向设置为前倾、后倾、左倾和右倾,倾斜角为 6°、12°、18°),结果表明:对比无充种斜面的排种盘,带有双侧充种斜面的排种盘无论倾斜方向或角度如何变化(0°~18°),排种器合格指数均大于 93%,漏播指数均小于 4%,且差异性较小。该排种器可为丘陵山区玉米播种机研发和应用提供参考。

关键词: 玉米; 水平圆盘式排种器; 丘陵坡地; 精量播种

中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)01-0151-13　　**OSID**:

Design and Test of Horizontal Disc Maize Precision Seed Metering Device on Hilly Land

HE Xiantao[1,2]　QI Haojun[1]　ZHANG Dongxing[1,2]　YANG Li[1,2]　CUI Tao[1,2]　ZHANG Kailiang[1,2]　SANG Xingchao[1]

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

Abstract: In order to improve the quality of the seed metering device under the condition of high slope and incline, a horizontal disc maize precision seed metering device for hilly land was designed. Based on the analysis of the factors affecting the performance of the horizontal disc seed metering device, the inclined holes with different end surfaces and the ring-shaped shell which divided into regions were designed, the key structural parameters were determined. The double-sided seed filling slopes of the disc were designed to improve the fluidity and seed filling performance of the seed group. With the small end surface diameter of the hole, the seed guide slope angle, and the rotation speed of the seed disc as the test factors, the qualified index, the missing index and the multiple index as the evaluation indexes, the quadratic orthogonal rotary regression combination test was carried out and the parameters were optimized. The results showed that when the small end surface diameter was 11.25 mm, the seed guide slope angle was 57.43°, and the rotation speed of the seed disc was 10.56 r/min, the qualified index was 94.77%, the missing index was 1.47%, and the multiple index was 3.86%, which met the requirements of precision seeding. Under the optimized parameters, the performance test of the seed metering device under the inclined condition was carried out (the inclination directions were forward, backward, left and right, and the inclination angles were 6°, 12° and 18°). The results showed that compared with the disc without a filling slope, the disc with a double filling slopes no matter the inclination angle directions or angles were changed (0°~18°), the qualified index of the seed metering device was greater than 93%, and the missing index was less than 4%, and the difference was small. The seed metering device can provide references for the development and application of maize planter in hilly and mountainous areas.

Key words: maize; horizontal disc seed metering device; hilly land; precision seeding

收稿日期: 2024-08-04　修回日期: 2024-10-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000404)和国家玉米产业技术体系建设项目(CARS-02)

作者简介: 和贤桃(1990—),男,副教授,博士生导师,主要从事智能农业装备研究,E-mail: hxt@cau.edu.cn

通信作者: 杨丽(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备及其智能化研究,E-mail: yangli@cau.edu.cn

0 引言

玉米是我国第一大粮食作物,在农业生产中占据着至关重要的地位[1]。我国丘陵山区约占国土面积的 70%,是保障国内粮食产量和确保国家粮食安全的关键区域[2-3]。而该地区具有地块小而分散、坡度陡而不一、地形起伏多变等特点,玉米机械化播种作业困难,也是现有玉米播种机在丘陵山区难以推广应用的核心原因之一。因此,研发适应丘陵山区播种作业的专用机型具有重要意义。

排种器是播种机的核心工作部件,其排种性能是影响播种质量的关键因素[4-5]。排种器根据工作原理分为气力式和机械式 2 种类型[6]。气力式排种器[7-13]播种效果良好且适应高速播种,但是其整体结构复杂且需要配套风机,使得播种机整机笨重。因此,气力式排种器在中大型播种机中广泛应用,不满足丘陵山区轻量化作业的要求。机械式排种器具有多种设计样式[14-17],其在工作时无需风机提供风压,相比气力式排种器,减轻了整机质量,并降低了配套动力和生产成本,因此更适宜丘陵山区播种作业。相比机械式垂直圆盘排种器,水平圆盘式排种器借助种子重力完成充种和清种作业,而无需克服重力做功,因此在丘陵山区播种作业时携种性能更强[18-20]。然而,目前水平圆盘式排种器主要针对平原地区设计,在高起伏和大坡度的丘陵山区作业时依然存在充种性能不稳定、种子易掉落等问题,影响最终播种质量及作物产量。

针对以上问题,本文设计一种丘坡地水平圆盘式玉米精量排种器。设计在大坡度条件下能够稳定携种的异端面斜向型孔以提高充种率,提出在排种盘型孔附近布置双侧充种斜面的方式提高种子群的流动性和充种性能,设计可安装清种毛刷的环形分区壳体以提高清种效率,开展排种器性能试验,以期为丘陵山区玉米播种机研发和应用提供技术支持。

1 排种器结构与工作原理

丘坡地水平圆盘式玉米精量排种器主要由种箱、环形分区壳体、排种盘、底盘、清种毛刷、推种机构、种子姿态导向装置、锥齿轮换向器等组成。种箱、环形分区壳体和排种盘共同构成排种器容纳种子的空间,形成了充种腔、携种与复充种腔、携种腔和投种腔结构。不同腔室之间相对独立,环形分区壳体内部沿圆周方向布置有与排种盘配合使用的清种毛刷和推种机构,底盘上设有投种口、种子姿态导向装置和锥齿轮换向器,投种口位于推种机构正下方,其结构如图 1 所示。

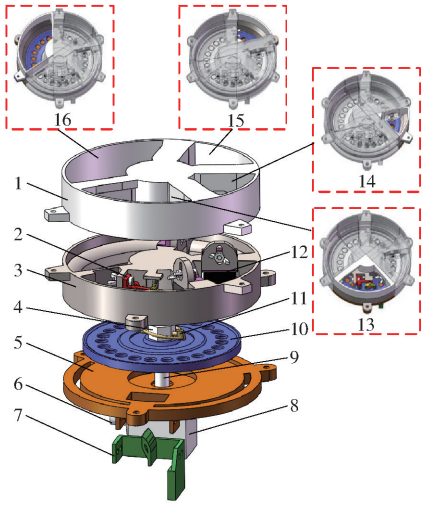


图 1 排种器爆炸结构示意图

Fig. 1 Schematic of explosion structure of seed metering device

1. 种箱 2. 推种机构 3. 环形分区壳体 4. 主轴轴套 5. 底盘 6. 动力输入轴 7. 种子姿态导向装置 8. 锥齿轮换向器 9. 主传动轴 10. 排种盘 11. 轴固定销 12. 清种毛刷 13. 投种腔 14. 携种腔 15. 携种与复充种腔 16. 充种腔

排种器工作过程如图 2 所示,总体分为充种、清种和投种 3 个阶段,其工作区域划分为充种区、综合作业区和投种区,在综合作业区可完成清种、携种和复充种工作。排种盘转动 1 周为 1 个工作周期,在 1 个工作周期内至少进行 1 次充种和完成 3 次清种作业。排种器工作时,位于充种区的部分种子在重力、离心力共同作用下充入型孔中,其余种子首先经过综合作业区的一级清种毛刷,该处毛刷距离盘面一定高度,允许部分种子通过该毛刷降低种子群的密度,同时起到清种的作用;随着排种盘的转动,通过一级清种毛刷的部分种子在一级和二级清种毛刷之间区域聚集,对于在充种区未及时充上种子的型孔在该区域可进行一次重复充种,同时位于综合作业区的二级清种毛刷进一步阻挡种子,并清除型孔中多于 1 粒的种子,为了达到更好的清种效果,该处毛刷设置在与盘面贴合的位置;随着排种盘的继续转动,若在种子群力的挤压作用下仍有部分从二级清种毛刷穿过的种子会到达位于综合作业区的三级清种毛刷处,该处的毛刷设置在与盘面贴合的位置上,完成最终的清种和挡种工作,防止多余种子进入投种区;型孔中随着排种盘转动到达投种区的种子在自身重力以及推种机构轮齿推力的共同作用下从投种口下落,在种子姿态导向装置作用下,调整种子姿态使其以直线方向下落从而完成投种,实现玉米精量排种。

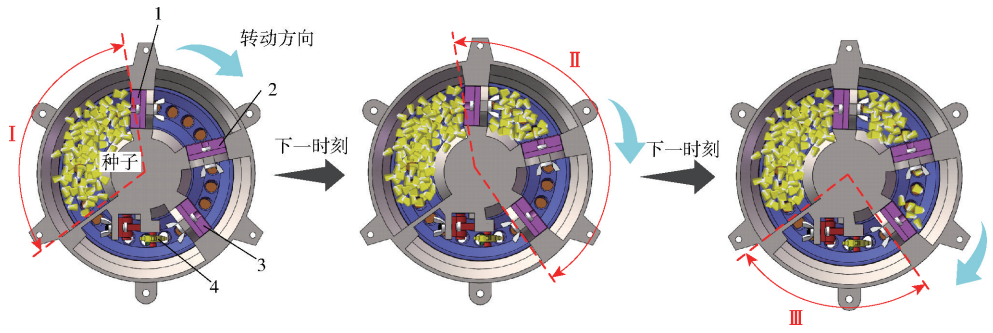


图 2　排种器工作过程示意图

Fig. 2　Schematic of working process of seed metering device

1. 一级清种毛刷　2. 二级清种毛刷　3. 三级清种毛刷　4. 推种机构　Ⅰ. 充种区　Ⅱ. 综合作业区　Ⅲ. 投种区

2　影响水平圆盘排种器性能原因分析

水平圆盘排种器主要依靠良好的型孔结构和清种效果来达到单粒精量播种的目的，不恰当的型孔结构会影响充种质量，充种面太大或太小都会造成不同程度的重播或漏播，因此设计适宜的型孔结构将改善单粒囊种效果。清种效果也将对排种器的性能造成影响，气力式排种器充种后种子群不聚集，其清种装置[21-23]多作用于清除型孔周围少量种子，而水平圆盘排种器工作时种子长时间大量堆积在排种盘表面，如图 3 所示，排种盘牵引力与排种盘和种子群的摩擦力满足

$$\begin{cases} f_{zq} = \mu SGe \\ M_{zq} = f_{zq} l_{zq} \\ M_t = F_t r \\ M_t = M_{zq} \\ 0 < l_{zq} \leqslant r \end{cases} \tag{1}$$

式中　f_{zq}——排种盘与种子群的摩擦力，N

G——单粒种子所受重力，N

e——单位面积种子粒数

S——种子群与排种盘的接触面积，m^2

r——排种盘半径，mm

μ——种子与排种盘摩擦因数

l_{zq}——单位面积种子群所在盘面位置，mm

F_t——排种盘牵引力，N

M_{zq}——种子群与盘面的摩擦力矩，N·m

M_t——排种盘牵引力矩，N·m

由式(1)可知，当充入一定量的种子时，减小种子群与排种盘的接触面积 S 将有利于减小其之间的摩擦力 f_{zq}，进而减小牵引力 F_t 以降低动力损耗，从而避免伤种和种盘磨损的问题，若清种结构单一会导致清种不彻底而出现重播，因此在减小种子群与排种盘接触面积的同时，设计能够降低种子群密度并实现多次清种的结构将有利于提高清种效率和型孔单粒率。

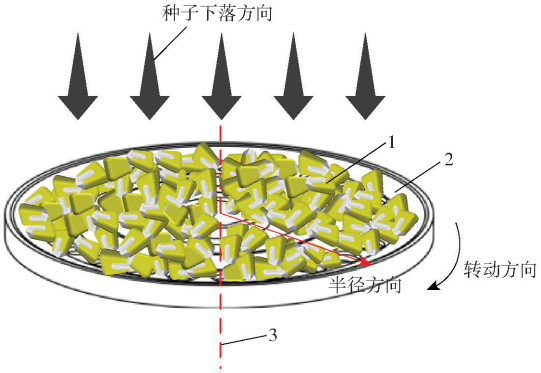


图3　排种盘表面种子堆积示意图

Fig. 3　Schematic of seed accumulation on surface of seed disc

1. 种子　2. 排种盘　3. 传动轴

3　排种器关键结构设计与参数分析

3.1　排种盘直径与型孔数确定

排种盘是排种器中用于充种、携种并实现精量播种的核心工作部件。排种盘直径不仅决定排种器整体尺寸，而且影响型孔排布与数量，因此合理地选择排种盘直径与型孔数有利于保证排种效果。排种盘直径过大会增大排种器整体结构尺寸导致排种盘和壳体加工材料用量增加，不利于丘陵山区坡地轻量化作业要求，根据排种盘几何尺寸得

$$\begin{cases} \omega = \dfrac{2\pi n}{60} \\ L_c = \omega t_c (r - a_z) \\ \theta = \dfrac{L_c}{r - a_z} \end{cases} \tag{2}$$

式中　n——排种盘转速，r/min

L_c——充种区弧长，mm

ω——排种盘角速度，rad/s

θ——充种角，rad

t_c——充种时间，min

a_z——型孔中心到种盘外边缘的距离，mm

由式(2)可得

$$t_c = \frac{30\theta}{\pi n} \tag{3}$$

由式(3)可知,充种时间与充种角和排种盘转速的比值成正比,当排种盘转速或充种角一定时,充种时间仅随充种角和排种盘的变化而变化,因此充种时间仅与排种盘转速和充种角有关,与排种盘直径无关[24-25]。由于丘陵山区地形条件的影响,尽可能增加充种时间将有利于提高充种率,结合排种器结构和式(3)确定排种盘直径为 160 mm。若型孔太靠近排种盘边缘,不仅会影响种盘边缘强度,而且会增大种子运动的线速度从而影响投种质量,因此综合考虑确定型孔所在圆周直径为 122 mm。

排种盘转速、机组作业速度和型孔数之间有密切的关系。为满足精量播种要求,机组在作业时间 t 后有

$$\begin{cases} 30v_p = \pi nr \\ S_p = nzt \\ bS_m = v_m t \\ S_p = S_m \end{cases} \tag{4}$$

式中 v_p——排种盘线速度,m/s

S_p——时间 t 内排种器排出的种子数

z——排种盘型孔数

t——机组作业时间,min

S_m——机组前进 t 时间实际播的株数

v_m——机组前进速度,m/s

b——穴距,mm

由式(4)可得

$$z = \frac{60v_m}{bn} \tag{5}$$

由式(5)可知当播种株距一定时,型孔数与机组前进速度成正比,与排种盘转速成反比。在丘陵山区作业的播种设备多为小型机,为保证作业稳定性和播种效果,作业速度取 6 km/h[26],玉米播种株距取 25 cm,排种盘线速度一般不大于 0.2 m/s,将相关量代入式(5),可得 $z \geqslant 17$。型孔数量对排种均匀性存在一定的影响,若相邻两型孔间距太小则不利于种子有效地分离,而且会降低排种盘的强度,因此结合型孔所在圆周直径综合考虑取型孔数量为 23。为了保证排种的均匀性,23 个型孔应均布在型孔所在圆周上,因此相邻型孔之间的夹角 φ 满足 $\varphi = 360°/23 = 15.7°$。

3.2 排种盘双侧充种斜面设计

种子下落至表面平整的排种盘后在型孔周围向上平整堆积,底部的种子群易形成与盘面垂直的力链,力链之间相互作用而架拱[27],种子群失去活跃性而造成漏播。为了增强种子群活跃性以提高充种性能,在排种盘型孔的内外圆周两侧分别设计一个充种斜面,底部种子群在斜面作用下向型孔方向流动,从而带动上方种子群的运动,使力链断开从而提高充种性能。斜面的角度对充种效果会产生不同的影响:若倾角太小无法促进种子流动,倾角太大则又造成排种盘结构不均,影响清种毛刷与盘面的贴合,进而影响清种效果,因此对斜面的参数进行设计。

3.2.1 外侧充种斜面

外侧充种斜面靠近排种盘边缘,如图 4 所示,以充种时单粒玉米种子的质心 O_1 为原点建立平面直角坐标系 $x_1O_1y_1$(不考虑玉米种子间的相互作用力)。种子在 x_1 方向上的合力作用下充入型孔,在 y_1 方向上处于相对静止状态,此时种子受力平衡方程为

$$\begin{cases} N_1 = G\cos\alpha_1 + F_{c1}\sin\alpha_1 \\ F_h = G\sin\alpha_1 - f_1 - F_{c1}\cos\alpha_1 \\ f_1 = \mu N_1 \\ F_{c1} = m\omega^2 r_1 \\ G = mg \end{cases} \tag{6}$$

式中 N_1——外侧斜面对种子的支持力,N

F_{c1}——外侧斜面种子所受离心力,N

α_1——外侧充种斜面倾角,(°)

F_h——种子在 x_1 方向所受合力,N

f_1——种子与外侧斜面的摩擦力,N

m——种子质量,kg

r_1——外侧斜面种子所在位置半径,mm

g——重力加速度,mm/s²

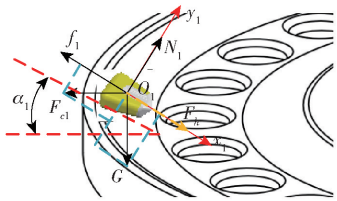


图 4 外侧斜面种子受力分析

Fig. 4 Force analysis of seed on outer slope

如图 5 所示,种子在合力作用下从位置 P_1 运动到位置 P_2。外侧斜面长度为 l_w,外侧斜面横向距离 L_w 由型孔所在圆周和排种盘半径确定为 8 mm,假设种子的初速度为 0 m/s,沿着斜面相对于型孔做匀加速直线运动,根据牛顿第二定律、运动定律和几何关系,种子的运动和受力方程为

$$\begin{cases} l_w = \dfrac{1}{2}a_1 t_1^2 \\ F_h = ma_1 \\ \dfrac{L_w}{l_w} = \cos\alpha_1 \end{cases} \tag{7}$$

式中　a_1——外侧种子运动加速度，mm/s^2

t_1——外侧种子运动至型孔的时间，s

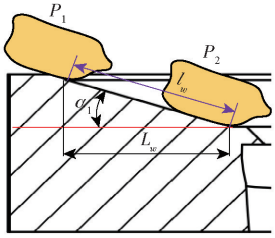


图 5　外侧斜面种子运动学分析

Fig. 5　Kinematic analysis of seed on outer slope

联立式(6)、(7)可得外侧种子运动至型孔的时间为

$$t_1=\sqrt{\frac{\dfrac{2L_w}{\cos\alpha_1}}{(g-\mu\omega^2 r_1)\sin\alpha_1-(\mu g+\omega^2 r_1)\cos\alpha_1}} \tag{8}$$

当斜面倾角增大时，所需要的沿斜面方向的合力随之减小，但由于种子在靠近排种盘边缘下落，沿斜面下滑时需要克服离心力，为了更好地保证清种效果和种盘结构合理，由式(8)可得，当种子以最短时间运动至型孔时取 $\alpha_1=17.4°$。

3.2.2　内侧充种斜面

内侧充种斜面靠近排种盘传动轴，如图 6 所示，以充种时单粒玉米种子质心 O_2 为原点建立平面直角坐标系 $x_2O_2y_2$(不考虑玉米种子间相互作用力)。

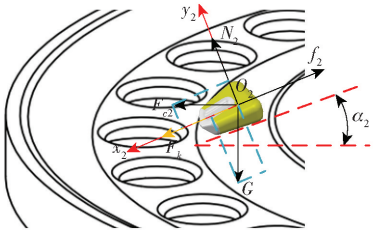


图 6　内侧斜面种子受力分析

Fig. 6　Force analysis of seed on inner slope

与外侧斜面分析方法相同，种子在 x_2 方向上的合力作用下充入型孔，在 y_2 方向上处于相对静止状态，此时种子受力平衡方程为

$$\begin{cases}N_2=G\cos\alpha_2-F_{c2}\sin\alpha_2\\ F_k=G\sin\alpha_2+F_{c2}\cos\alpha_2-f_2\\ f_2=\mu N_2\\ F_{c2}=m\omega^2 r_2\\ G=mg\end{cases} \tag{9}$$

式中　N_2——内侧斜面对种子的支持力，N

F_{c2}——内侧斜面种子所受离心力，N

α_2——内侧充种斜面倾角，(°)

F_k——种子在 x_2 方向所受合力，N

f_2——种子与内侧斜面的摩擦力，N

r_2——内侧斜面种子所在位置半径，mm

如图 7 所示，种子在合力作用下从位置 P_3 运动到位置 P_4。内侧斜面长度为 l_n，内侧斜面横向距离 L_n 由型孔所在圆周和环形分区壳体的聚种凸台位置确定为 9 mm，与外侧斜面种子分析相同，从 P_3 到 P_4 种子运动和受力方程为

$$\begin{cases}l_n=\dfrac{1}{2}a_2t_2^2\\ F_k=ma_2\\ \dfrac{L_n}{l_n}=\cos\alpha_2\end{cases} \tag{10}$$

式中　a_2——内侧种子运动加速度，mm/s^2

t_2——内侧种子运动至型孔的时间，s

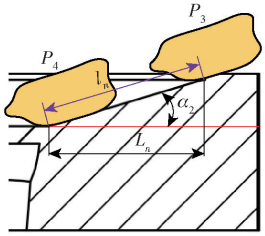


图 7　内侧斜面种子运动学分析

Fig. 7　Kinematic analysis of seed on inner slope

联立式(9)、(10)可得内侧种子运动至型孔的时间为

$$t_2=\sqrt{\frac{\dfrac{2L_n}{\cos\alpha_2}}{(g+\mu\omega^2 r_2)\sin\alpha_2+(\omega^2 r_2-\mu g)\cos\alpha_2}} \tag{11}$$

内侧斜面位置在型孔所在圆周内侧，当排种盘转动时，处于内侧斜面上的种子可利用离心力顺势充入型孔中，为了避免与外侧斜面种子充入型孔时发生竞争而造成多充或漏充，内侧斜面倾角小于外侧斜面倾角，结合式(11)可得，当种子以最短时间运动至型孔时取 $\alpha_2=13°$。

3.3　异端面斜向型孔设计

型孔是排种盘的重要组成部分，其结构对充种、清种以及排种质量均会产生重要影响，若型孔结构不佳，则无法较好地控制单粒率，因此对型孔结构参数进行设计。

3.3.1　型孔结构

为了提高排种器在水平和倾斜工况下的充种性能，设计一种异端面斜向型孔，如图 8 所示。

型孔结构为：排种盘上表面的小端面为充种面，种子从该面充入型孔中；排种盘下表面的大端面为落种面，其尺寸大于种子平均尺寸，当排种盘旋转或倾斜时，大端面与小端面产生尺寸差而延伸出的空间可以适应种子在型孔内小范围的活动和改变充种时的姿态，避免在落种时卡在内部壁面而无法及时

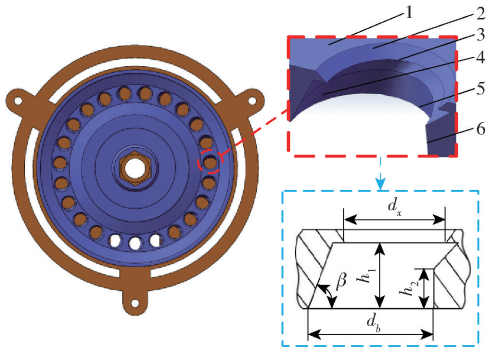


图 8 型孔结构示意图

Fig. 8 Schematic of shaped hole structure

1. 排种盘 2. 充种倒角 3. 型孔小端面 4. 导种斜面 5. 型孔大端面 6. 直壁面

下落;当种子从小端面充入后,导种斜面可引导促进种子进入型孔内部,并与小端面共同作用以限制充入型孔种子的数量从而提高单粒率;充种倒角可辅助种子从小端面落入型孔中;直壁面结构平整规则,可为种子姿态调整提供平整的空间,防止种子卡在型孔壁面上。

3.3.2 型孔端面与深度

为了更好地设计型孔结构,分析种子落入型孔中的姿态,对种子进行单粒自由落体试验,利用计算概率的方法得到单粒时平躺、侧立和站立 3 种姿态的概率分别为 68%、21% 和 11%,圆形型孔对于种子填充时的适应性较高,可以大大提高种子填充几率,因此两端面结构均设计为圆形。分析种子几何尺寸特征有利于研究型孔尺寸[28],以丘陵山区播种的正红 6 号玉米种子作为研究对象,随机选取 1 000 粒种子,使用 GREENER 生产的精度为 0.01 mm 的玻璃栅数显游标卡尺分别对其长度 L、宽度 W、厚度 H 3 个方向特征尺寸进行测量统计并分析,统计结果如表 1 所示。

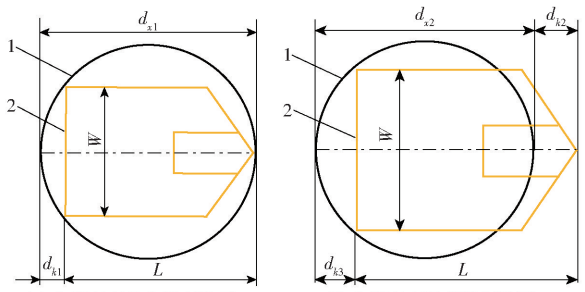
表 1 玉米种子特征尺寸

Tab. 1 Characteristic size of maize seed mm

尺寸参数	最大值	最小值	平均值
长	13.08	8.54	11.09
宽	10.34	4.93	7.99
厚	9.47	3.41	5.47

如图 9a 所示,种子以平躺姿态落入大尺寸的小端面,d_{x1}为型孔小端面的直径上限,此时作为充种面的小端面可正好囊括自由下落的种子,但会造成种子充入量较多而重播。

因此为了限制落入型孔中种子数量使种子斜向下落,设计使小端面尺寸略小于种子尺寸。如图 9b 所示,d_{x2}为型孔小端面的直径下限,2 种情况下种子在长度方向的对称线与型孔直径重合。小端面直径



(a) 小端面直径上限与种子尺寸关系图 (b) 小端面直径下限与种子尺寸关系图

图 9 型孔小端面直径与种子尺寸关系图

Fig. 9 Relation diagram between diameter of small end surface and size of seed

1. 型孔小端面 2. 平躺种子

与种子尺寸关系满足

$$\begin{cases} d_{k1}=\dfrac{d_{x1}}{2}-\sqrt{\left(\dfrac{d_{x1}}{2}\right)^2-\left(\dfrac{W}{2}\right)^2} \\ d_{k1}=L-d_{x1} \\ d_{k2}=L+d_{k3}-d_{x2} \\ d_{k2}<\dfrac{1}{3}L \\ d_{k3}=\dfrac{d_{x2}}{2}-\sqrt{\left(\dfrac{d_{x2}}{2}\right)^2-\left(\dfrac{W}{2}\right)^2} \\ d_{x2}<d_x<d_{x1} \end{cases} \tag{12}$$

式中 d_x——型孔小端面直径,mm

d_{k1}——型孔小端面直径上限与种子长度差值,mm

d_{k2}——种子长度方向超出型孔小端面直径下限的距离,mm

d_{k3}——d_{x2}、d_{k2}之和与 L 的差值,mm

结合式(12)和所测得种子尺寸,确定型孔小端面的直径取值范围为 9.55 ~ 12.53 mm,最优参数取值结合后续优化试验确定。

为了能够实现单粒顺利落种,避免种子卡在型孔内,对大端面尺寸进行分析。如图 10 所示,当型孔中充入 1 粒平躺姿态和 1 粒站立姿态的种子时,分析型孔大端面上限直径 d_{bm},平躺姿态种子在长度方向的对称线与型孔直径平行,大端面直径与种子尺寸关系满足

$$\begin{cases} L_1=\sqrt{\left(\dfrac{d_{bm}}{2}\right)^2-\left[W+H-\sqrt{\left(\dfrac{d_{bm}}{2}\right)^2-\left(\dfrac{W}{2}\right)^2}-\dfrac{W}{2}\right]^2} \\ L_2=\sqrt{\left(\dfrac{d_{bm}}{2}\right)^2-\left[W+H-\sqrt{\left(\dfrac{d_{bm}}{2}\right)^2-\left(\dfrac{W}{2}\right)^2}\right]^2} \\ L=L_1+L_2 \\ d_b<d_{bm} \end{cases} \tag{13}$$

式中 d_b——型孔大端面直径,mm

L_1——种子胚芽端与大端面轴线距离，mm

L_2——种子尾端与大端面轴线距离，mm

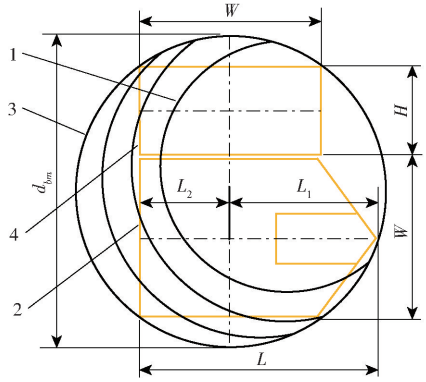


图 10　型孔大端面直径与种子尺寸关系图

Fig. 10　Relation diagram between diameter of big end surface and size of seed

1. 型孔小端面　2. 平躺种子　3. 型孔大端面　4. 站立种子

由式(13)可得型孔大端面直径需小于其上限尺寸，即 $d_b < 15.57$ mm，结合小端面型孔上限直径和种子尺寸，大端面直径取 13 mm。

型孔的深度也会影响充种性能，若型孔太深会使多粒种子叠加不利于清种，若太浅则会使大部分种子暴露在型孔之外，清种阶段会被清掉，因此要对型孔深度加以控制。如图 11 所示，当型孔中充入 2 粒平躺种子时，型孔深度、直壁面高度和种子尺寸关系满足

$$\begin{cases} h_1 = H + h_3 \\ h_3 < \dfrac{1}{3}H \\ h_2 < H < h_1 \\ l = \dfrac{1}{2}(d_b - d_x) \end{cases} \tag{14}$$

式中　h_1——型孔深度，mm

h_2——直壁面高度，mm

h_3——种子厚度与型孔深度差值，mm

l——型孔端面半径差，mm

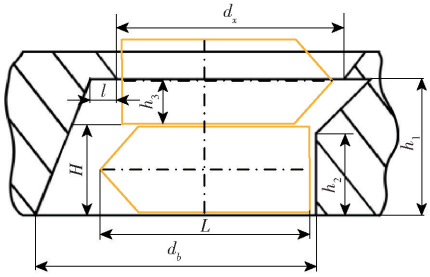


图 11　型孔深度与种子尺寸关系图

Fig. 11　Relation diagram between hole depth and size of seed

由式(14)可得型孔深度取值范围为 5.47 mm < h_1 < 7.29 mm，结合毛刷可弯折长度和种子尺寸，确定型孔深度为 6 mm，型孔端面直径差依据小端面和大端面的直径共同来确定，结合型孔结构取直壁面高度为 3 mm。为了使种子更好地滑入型孔中，在小端面上设置充种倒角，结合小端面的尺寸，充种倒角尺寸取 1 mm × 45°。

3.3.3　充种分析与导种斜面设计

为了更好地提高型孔对种子的适应性，提高型孔填充率和单粒率，对单粒种子充入型孔的状态进行分析。如图 12 所示，位于型孔边缘的种子在外界种子群的推动作用下充入型孔中，对种子该时刻的状态进行运动学分析，公式为

$$\begin{cases} x = v_c t_x = \dfrac{1}{2}(d_x + d_b) - l_z \\ y = h_z = \dfrac{1}{2}g t_x^2 \\ n = \dfrac{30 v_c}{\pi r} \end{cases} \tag{15}$$

式中　l_z——种子质心与小端面边缘距离，mm

h_z——种子质心与盘面高度，mm

v_c——种子运动速度，mm/s

t_x——种子充入型孔所需时间，s

由式(15)可得，为了保证型孔填充率，排种盘极限转速需满足

$$n_{\max} \leqslant \frac{15}{\pi r}\sqrt{\frac{g}{2h_z}}(d_x + d_b - 2l_z) \tag{16}$$

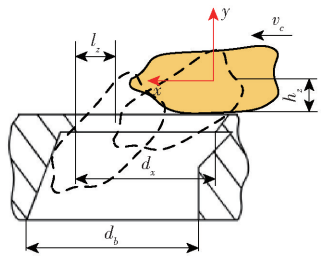


图 12　充种过程运动学分析

Fig. 12　Kinematic analysis when seed filling hole

由此可知，排种盘极限速度与型孔端面直径及种子质心与小端面边缘距离等有关，当排种盘转速过大时，种子较难充入型孔中，而适当增大充种距离有利于提高型孔填充率，因此将型孔内部壁面设计为斜向结构，增大横向长度以引导种子充入型孔中，如图 13 所示，种子接触斜面时受力为

$$\begin{cases} G = mg \\ f_b = \mu T_b \\ G + T_b\cos\beta - f_b\sin\beta = ma \end{cases} \tag{17}$$

式中　f_b——种子与导种斜面的摩擦力，N

T_b——导种斜面对种子的推力，N

a——型孔中下落时种子加速度，mm/s^2

β——导种斜面倾角，(°)

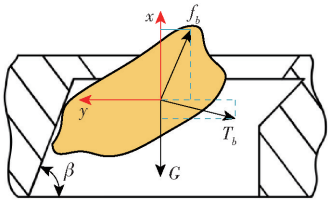


图 13 种子接触斜面受力分析

Fig. 13 Force analysis of seed contact slope

由式(17)可得

$$a = g - \frac{T_b(\mu\sin\beta - \cos\beta)}{m} \tag{18}$$

当种子下落的加速度 $a > g$ 时,种子可以较快充入型孔中,但加速度过大也会导致落种后与型孔底部的碰撞而较难趋于稳定状态,因此根据式(18)建立参数方程

$$f(x) = \mu\sin\beta - \cos\beta \tag{19}$$

将参数方程导入 Matlab 中分析,种子与排种盘之间的摩擦因数设为 0.39[29],当倾角增加时,函数 $f(x)$ 值不断增大,种子下落的加速度大于重力加速度,有利于种子充入型孔中,但当倾角继续增大时,种子下落速度放缓,无法及时充入型孔中,因此结合型孔的结构设计和前期试验,确定导种斜面倾角为 45°~74°。

3.4 环形分区壳体设计

清种是将充入型孔中多余的种子清除,以保证型孔中只留有 1 粒种子。结合前文对影响水平圆盘排种器性能原因分析,设计了一种环形分区壳体结构,该结构可满足多个清种毛刷协同作业,实现分区域多级柔性清种。为了保证有较好的充种和清种效果,分析环形分区壳体结构参数,将其整体划分为 7 个区域,如图 14 所示,区域 A 为充种区,区域 B 为一级清种区,区域 C 为携种与复充种区,区域 D 为二级清种区,区域 E 为携种区,区域 F 为三级清种区,区域 G 为投种区。清种毛刷安装在环形分区壳体 3 个清种区对应位置上,推种机构安装在投种区,清种区与投种区的尺寸由清种毛刷和推种机构的结构确定,不同作业区域角度与排种盘型孔之间的关系满足

$$\begin{cases} \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5 + \gamma_6 = 2\pi - \gamma_7 \\ \gamma_2 = \gamma_4 = \gamma_6 = \dfrac{2\pi}{z} \\ \gamma_1 > \gamma_3 > \gamma_5 \\ \gamma_1 = \dfrac{2\pi(m_1 - 1)}{z} + \gamma_0 \\ \gamma_5 = \dfrac{2\pi(m_2 - 1)}{z} + \gamma_0 \\ \gamma_7 = \dfrac{2\pi(m_3 - 1)}{z} + \gamma_0 \end{cases} \tag{20}$$

式中 γ_1——充种区角度,(°)

γ_2——一级清种区角度,(°)

γ_3——携种与复充种区角度,(°)

γ_4——二级清种区角度,(°)

γ_5——携种区角度,(°)

γ_6——三级清种区角度,(°)

γ_7——投种区角度,(°)

γ_0——排种盘中心引出同一型孔两切线的夹角,(°)

m_1——充种区排种盘型孔数

m_2——携种区排种盘型孔数

m_3——投种区排种盘型孔数

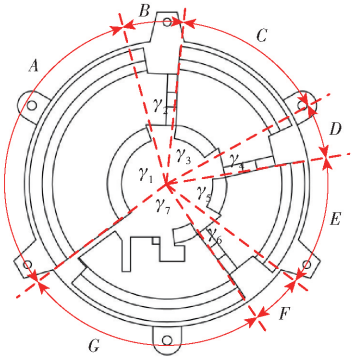


图 14 环形分区壳体作业区域划分

Fig. 14 Ring-shaped shell which divided into regions operating area division

前期设计得到排种盘总型孔数为 23,推种机构位于投种区,根据其结构设计以及安装位置确定投种区角度为 87.5°,根据式(20)取投种区型孔数为 5。清种区毛刷太厚会增大与盘面之间的摩擦力,从而影响清种效果,通过试验得到每个毛刷厚度正好覆盖单个型孔面积时有较好的清种效果,因此确定 3 个清种区角度均等于两型孔之间夹角,即取 15.7°。其余区域角度由充种区、携种与复充种区和携种区来划分,排种器在倾斜工况下作业时易受到倾斜角度的影响,减小携种区的角度,即减少携种区型孔数能缩短种子到达投种区的距离,从而降低种子脱离型孔的概率,但角度太小也会与前一级清种发生冲突,因此确定携种区型孔数为 3,由式(20)可得对应角度为 43°;充种区域越大,种子接触排种盘上的型孔数越多,充种越充分,但当充种区角度增大时,携种与复充种区角度随之减小,若角度太小则会导致种子在该区域堆积,从而影响复充种和清种效果,因此结合前期试验,当充种区角度大于携种与复充种区角度,且充种区型孔数为携种与复充种区的两倍时有较好的充种效果,以达到降低种子群密度并实现复充种目的,充种区和携种与复充种区型孔数和为 12,由式(20)可得充种区角度为 121.3°,携

种与复充种区角度为 61.1°。

4　排种性能试验

4.1　试验材料与设备

选用“正红 6 号”玉米种子作为台架试验样本，平均几何尺寸为 11.09 mm × 7.99 mm × 5.47 mm（随机选取 1 000 粒种子测量取平均值）。如图 15 所示，试验台架主要由安装台架、排种器、排种器性能检测仪、锥齿轮换向器、导种管和接种箱等组成。排种器清种毛刷可通过螺栓调整距离盘面的高度，推种机构通过螺栓和弹簧固定在投种区，相关结构采用 3D 打印的方式加工。采用中国农业大学自主研制的排种器性能检测仪[30]来检测种子的排种性能，可根据工作要求在检测仪上位机界面设置前进速度、作物株距和下种量等相关参数，位于导种管中部的红外传感器采集种子信号，通过计算得到合格指数、漏播指数和重播指数等指标。

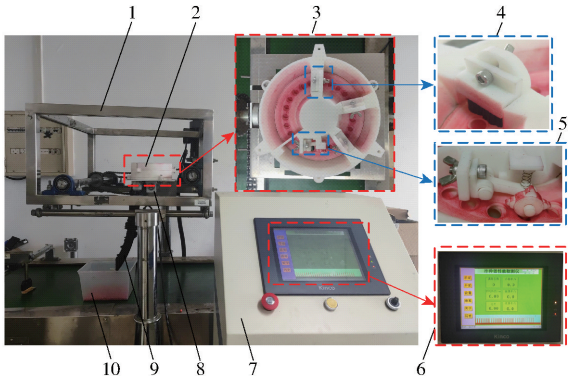


图 15　排种器试验台架

Fig. 15　Test bench of seed metering device

1. 安装台架　2. 排种器　3. 排种器俯视图　4. 清种毛刷　5. 推种机构　6. 上位机显示屏　7. 排种器性能检测仪　8. 锥齿轮换向器　9. 导种管　10. 接种箱

4.2　试验指标

根据 GB/T 6979—2005《单粒（精密）播种机试验方法》与玉米种植农业要求，以合格指数 Y_1、漏播指数 Y_2 和重播指数 Y_3 为性能评价指标，试验在排种器工作稳定情况下进行，每组试验测得排种器连续排出的 251 粒种子，重复进行 3 次取平均值。

4.3　正交试验

4.3.1　试验方案

为探究试验因素对评价指标的影响和因素之间的交互作用，以小端面直径、导种斜面倾角和排种盘转速为试验因素，以合格指数 Y_1、漏播指数 Y_2 和重播指数 Y_3 为性能评价指标，开展三因素五水平二次正交旋转回归组合试验。根据前文对影响充种性能理论研究，确定型孔小端面直径为 9.55 ~ 12.53 mm，导种斜面倾角为 45° ~ 74°，考虑到丘陵山区的作业环境和小型播种机的适应性[31]，确定排种盘转速为 8.7 ~ 17.9 r/min，试验因素编码如表 2 所示。

表 2　试验因素编码

Tab. 2　Test factors and codes

编码	因素		
	小端面直径/mm	导种斜面倾角/(°)	排种盘转速/(r·min^{-1})
1.682	12.53	74.00	17.90
1	11.93	68.12	16.04
0	11.04	59.50	13.30
−1	10.15	50.88	10.56
−1.682	9.55	45.00	8.70

4.3.2　试验结果与方差分析

根据表 2 利用软件 Design-Expert 对试验方案进行设计，共进行 23 组试验，其中 15 ~ 23 组为同因素水平下的试验，每组试验重复进行 3 次取平均值作为该次试验的结果，试验结果如表 3 所示。其中 X_1、X_2、X_3 为编码值。

表 3　试验方案与结果

Tab. 3　Test protocol and results

序号	因素			合格指数 Y_1/%	漏播指数 Y_2/%	重播指数 Y_3/%
	X_1	X_2	X_3			
1	−1	−1	−1	85.43	12.25	2.32
2	1	−1	−1	91.40	3.74	4.86
3	−1	1	−1	87.17	4.63	8.20
4	1	1	−1	85.50	1.57	12.93
5	−1	−1	1	84.10	13.68	2.22
6	1	−1	1	87.81	8.26	3.93
7	−1	1	1	84.27	8.05	7.68
8	1	1	1	78.90	7.20	13.90
9	−1.682	0	0	82.44	13.24	4.32
10	1.682	0	0	83.87	5.20	10.93
11	0	−1.682	0	83.90	13.50	2.60
12	0	1.682	0	78.31	4.66	17.03
13	0	0	−1.682	93.95	0.80	5.27
14	0	0	1.682	88.14	7.59	4.01
15	0	0	0	93.17	2.20	4.63
16	0	0	0	91.90	3.03	5.07
17	0	0	0	91.87	1.70	6.43
18	0	0	0	93.17	1.33	5.50
19	0	0	0	92.07	1.60	6.33
20	0	0	0	91.44	1.73	6.83
21	0	0	0	92.13	2.11	5.76
22	0	0	0	92.44	1.73	5.83
23	0	0	0	93.24	0.53	6.23

为进一步确定试验因素对各评价指标的影响，利用软件 Design-Expert 对试验结果进行方差分析，如表 4 所示。从表 4 可得，合格指数 Y_1、漏播指数

表 4 模型方差分析

Tab. 4 Variance analysis of model

方差来源	合格指数 Y_1				漏播指数 Y_2				重播指数 Y_3			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	500.04	9	111.24	<0.000 1 **	421.39	9	109.70	<0.000 1 **	303.14	9	64.70	<0.000 1 **
X_1	1.86	1	3.73	0.075 6	72.02	1	168.74	<0.000 1 **	50.17	1	97.09	<0.000 1 **
X_2	36.42	1	72.83	<0.000 1 **	71.95	1	168.59	<0.000 1 **	210.75	1	403.46	<0.000 1 **
X_3	42.85	1	85.70	<0.000 1 **	51.11	1	119.75	<0.000 1 **	0.533 4	1	1.02	0.330 7
X_1X_2	34.94	1	69.88	<0.000 1 **	12.55	1	29.41	0.000 1 **	5.61	1	10.74	0.006 0 **
X_1X_3	4.44	1	8.88	0.010 6 *	3.51	1	8.23	0.013 2 *	0.054 4	1	0.104 2	0.751 9
X_2X_3	2.62	1	5.24	0.039 4 *	1.20	1	2.81	0.117 3	0.273 8	1	0.504 2	0.481 9
X_1^2	150.02	1	300.02	<0.000 1 **	102.92	1	241.15	<0.000 1 **	4.57	1	8.75	0.011 1 *
X_2^2	229.14	1	458.25	<0.000 1 **	98.96	1	231.86	<0.000 1 **	27.30	1	52.26	<0.000 1 **
X_3^2	1.27	1	2.55	0.134 4	9.38	1	21.98	0.000 4 **	4.28	1	8.19	0.013 3 *
残差	6.50	13			5.55	13			6.79	13		
失拟	2.98	5	1.35	0.335 1	1.89	5	0.828 0	0.563 6	2.89	5	1.19	0.394 3
误差	3.52	8			3.66	8			3.90	8		
总和	207.17	22			426.94	22			310.93	22		

注：* 表示差异显著($0.01 \leqslant P < 0.05$)； ** 表示差异极显著($P < 0.01$)。

Y_2和重播指数 Y_3的 P 值均小于 0.000 1，可看出 3 个回归模型均极显著。其中合格指数 Y_1失拟项 P 为 0.335 1，漏播指数 Y_2失拟项 P 为 0.563 6，重播指数 Y_3失拟项 P 为 0.394 3，可看出 3 个回归模型拟合程度较好，R^2均大于 0.97，这表明模型可以解释评价指标超过 97% 的变化，因此该模型可以作为排种器工作参数的预测模型。

分析评价指标中各模型的差异显著性可看出，合格指数 Y_1回归模型中 X_2、X_3、X_1X_2、X_1^2、X_2^2 均为极显著，X_1X_3和 X_2X_3为显著，其余项为不显著；漏播指数 Y_2回归模型中 X_1、X_2、X_3、X_1X_2、X_1^2、X_2^2、X_3^2 为极显著，X_1X_3为显著，X_2X_3为不显著；重播指数 Y_3回归模型中 X_1、X_2、X_1X_2、X_2^2 为极显著，X_1^2、X_3^2 为显著，其余项为不显著。将回归方程中不显著交互项和平方项剔除后，得到 3 个评价指标与试验因素的二次回归方程为

$$Y_1 = 92.36 + 0.369\,4X_1 - 1.63X_2 - 1.77X_3 - 2.09X_1X_2 - 0.745\,0X_1X_3 - 0.572\,5X_2X_3 - 3.07X_1^2 - 3.08X_2^2 \tag{21}$$

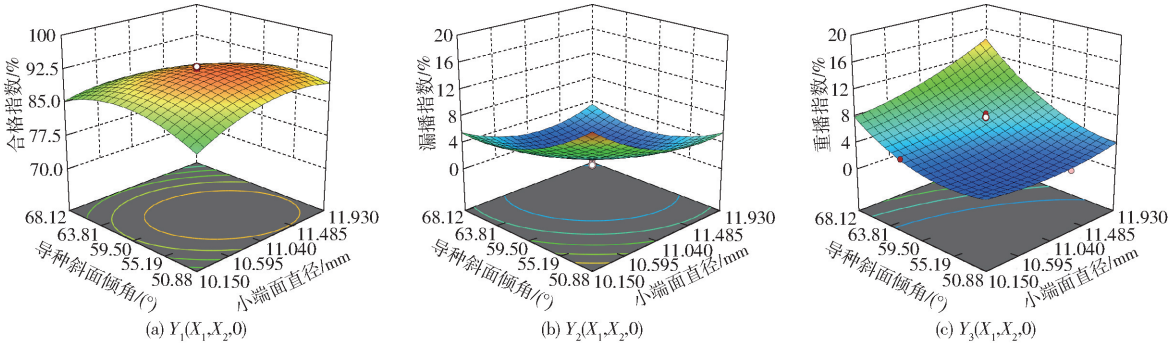
$$Y_2 = 1.78 - 2.3X_1 - 2.3X_2 + 1.93X_3 + 1.25X_1X_2 + 0.662\,5X_1X_3 + 2.55X_1^2 + 2.5X_2^2 + 0.768\,5X_3^2 \tag{22}$$

$$Y_3 = 5.86 + 1.93X_1 + 3.93X_2 - 0.197\,6X_3 + 0.837\,5X_1X_2 + 0.536\,5X_1^2 + 1.31X_2^2 - 0.518\,9X_3^2 \tag{23}$$

4.3.3 因素交互对评价指标的影响

合格指数是评价排种器工作性能最直接的指标，漏播指数和重播指数是影响排种器工作性能最关键的指标。为了进一步探究试验因素之间的交互作用对评价指标的影响，如图 16 所示，利用软件 Design-Expert 对试验数据进行处理后绘制因素交互作用响应曲面，以直观地分析导种斜面倾角和小端面直径对合格指数 Y_1、漏播指数 Y_2和重播指数 Y_3的作用规律。

固定排种盘转速为 13.3 r/min，由图 16a 可知，随着导种斜面倾角和小端面直径增大，合格指数呈先升高后降低趋势，当导种斜面倾角或小端面直径一定时，合格指数也呈先升高后降低趋势；由图 16b 可知，随着导种斜面倾角和小端面直径增大，漏播指



(a) $Y_1(X_1,X_2,0)$ (b) $Y_2(X_1,X_2,0)$ (c) $Y_3(X_1,X_2,0)$

图 16 试验因素对评价指标影响的响应曲面

Fig. 16 Influence of test factors on evaluation index

数呈先降低后升高趋势，当导种斜面倾角或小端面直径一定时，漏播指数也呈先降低后升高的趋势；由图 16c 可知，随着导种斜面倾角和小端面直径增大，重播指数呈先降低后升高趋势，当导种斜面倾角或小端面直径一定时，重播指数也呈先降低后升高趋势。分析以上响应面变化情况，其原因为：随着导种斜面倾角和小端面直径增大，型孔开口面积增加有利于种子充入型孔中，当两者继续增加时，型孔内部容种空间过大而无法起到约束充种数量作用，重播现象较明显；反之，随着导种斜面倾角和小端面直径的减小，型孔开口面积和内部容种空间不断减小，种子来不及充入型孔中，造成漏播现象明显。

4.3.4　参数优化与验证试验

为了得到排种盘最优参数，以合格指数 Y_1 最大、漏播指数 Y_2 和重播指数 Y_3 最小为目标进行参数优化求解，目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1,X_2,X_3) \\ \min Y_2(X_1,X_2,X_3) \\ \min Y_3(X_1,X_2,X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{24}$$

求解得到型孔小端面直径为 11.25 mm、导种斜面倾角为 57.43°、排种盘转速为 10.56 r/min 时，排种器作业性能最佳，此时合格指数为 94.1%，漏播指数为 0.77%，重播指数为 5.13%。为了验证优化结果的可靠性，在优化参数条件下，进行 3 次重复台架试验后取平均值，合格指数为 94.77%，漏播指数为 1.47%，重播指数为 3.86%，验证试验结果接近预测结果，正交试验优化结果可靠。

4.4　倾斜工况排种器性能试验

为证明本文设计的带有双侧充种斜面和异端面斜向型孔的排种盘在不同方向角度倾斜状态下有较好的充种性能，对比不带有双侧充种斜面的排种盘，在前文确定的排种器优化参数条件下进行倾斜工况性能试验，分析不同倾角下对合格指数和漏播指数的影响，倾斜方向设置为：前倾、后倾、左倾和右倾，倾斜角为：6°、12°、18°，每个角度下每组试验重复进行 3 次取平均值。

排种器合格指数和漏播指数随倾斜角和方向变化曲线如图 17 所示。当排种器在前进方向上左右倾斜时，在有斜面和无斜面情况下合格指数均呈先升高后降低趋势，原因是随着坡度增加，种子向排种盘边缘和中心两侧倾斜，型孔捕获种子的能力有所下降，漏播指数随之升高；带有双侧充种斜面的排种盘在左右倾斜时对应侧的斜面起到了促充种的作用，在无倾斜角时双侧斜面的促充种效应使合格指数最高且漏播指数最低，均优于无充种斜面时的情况。当排种器在上坡和下坡状态下前后倾斜时，合格指数呈先下降，有所升高后再下降趋势，原因是当排种器沿下坡方向前倾时，随着倾斜角增大，型孔周围多余的种子向远离清种毛刷方向滑动趋势不断增加，减轻了清种毛刷工作压力，因此合格指数有所升高，在前后倾斜时双侧充种斜面能够使种子沿盘面滑动的同时向型孔方向聚拢，有利于型孔充种。综合对比没有充种斜面排种盘，带有双侧充种斜面排种盘无论倾斜方向或角度如何变化（0° ~ 18°），排种合格指数均大于 93%，漏播指数均小于 4%，满足适用于丘陵山区坡地排种器的设计要求。

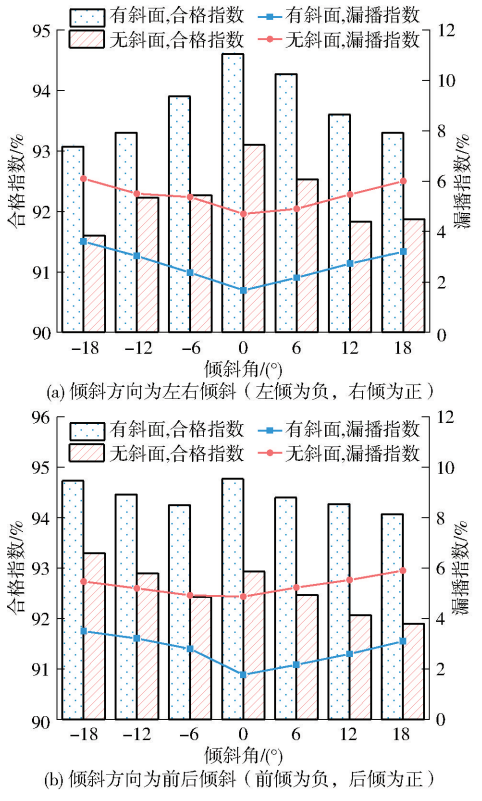


图 17　排种器合格指数和漏播指数随倾斜角和方向变化曲线

Fig. 17　Qualified index and missing index of seed metering device varied with inclination angles and directions

5　结论

（1）为满足丘陵山区高效作业的要求，提高排种器在大坡度倾斜工况下的播种质量，设计了一种丘坡地水平圆盘式玉米精量排种器，通过设计排种盘双侧充种斜面以提高种子群的流动性和充种性能，型孔设计为充种面与落种面不同的异端面结构以限制种子囊入数量和保证自由落种，导种斜面可引导种子顺利充入型孔中，设计了环形分区壳体结

构,可满足多个清种毛刷协同作业,实现分区域多级柔性清种,改善了传统水平圆盘排种器充种效果差、清种效率低等问题,提高了排种器作业性能。

(2)对影响排种器性能原因进行分析,分析种子充种情况并构建充种理论分析模型,确定了排种器关键结构参数:排种盘外侧充种斜面倾角为17.4°,内侧充种斜面倾角为13°,充种小端面直径为9.55~12.53 mm,落种大端面直径取13 mm,型孔深度为6 mm,直壁面高度为3 mm,导种斜面倾角为45°~74°,确定了影响排种器作业性能因素为型孔小端面直径、导种斜面倾角和排种盘转速。

(3)设计了正交试验以优化排种器结构参数,试验结果表明,当小端面直径为11.25 mm、导种斜面倾角为57.43°,排种盘转速为10.56 r/min 时,合格指数为94.77%,漏播指数为1.47%,重播指数为3.86%,满足玉米播种要求。进行了排种器倾斜工况性能试验,带有双侧充种斜面排种盘试验结果合格指数均大于93%,漏播指数均小于4%,均优于无充种斜面的排种盘,满足适用于丘陵山区坡地排种器设计要求。

参 考 文 献

[1] 胡凯, 张保军. 我国玉米生产现状及策略研究[J]. 农业与技术, 2019, 39(1): 65-66.
HU Kai, ZHANG Baojun. Research on current situation and strategy of maize production in China [J]. Agriculture and Technology, 2019, 39(1): 65-66. (in Chinese)

[2] 孙景彬, 刘志杰, 杨福增, 等. 丘陵山地农业装备与坡地作业关键技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 1-18.
SUN Jingbin, LIU Zhijie, YANG Fuzeng, et al. Research review of agricultural equipment and slope operation key technologies in hilly and mountains region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 1-18. (in Chinese)

[3] 王文明, 潘丽芹, 徐森富. 丘陵山区农业机械化发展现状与对策[J]. 现代化农业, 2023(11): 88-90.
WANG Wenming, PAN Liqin, XU Senfu. Development situation and countermeasures of agricultural mechanization in hilly and mountain areas[J]. Modern Agriculture, 2023(11): 88-90. (in Chinese)

[4] 肖跃进, 颜丙新, 凌琳, 等. 基于电机驱动的玉米精量排种控制系统开发与试验[J]. 拖拉机与农用运输车, 2024, 51(2): 52-59.
XIAO Yuejin, YAN Bingxin, LING Lin, et al. Design and experiment of motor-driving corn precision planting control system [J]. Tractor & Agricultural Transporter, 2024, 51(2): 52-59. (in Chinese)

[5] 刘刚. 常用精量排种器分析比较[J]. 农业科技与装备, 2012(9): 27-30.
LIU Gang. Analysis on the performance of various common precision seed sowing devices [J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2012(9): 27-30. (in Chinese)

[6] 侯云涛. 精量排种器的研究现状与发展趋势[J]. 现代农业装备, 2023, 44(4): 15-18.
HOU Yuntao. The research status and development trend of precision seeders[J]. Modern Agricultural Equipment, 2023, 44(4): 15-18. (in Chinese)

[7] 李东洋, 金厚熙, 雷德超, 等. 国内气力式玉米精量排种器研究进展[J]. 现代农业科技, 2023(16): 136-138.
LI Dongyang, JIN Houxi, LEI Dechao, et al. Research progress on pneumatic corn precision seed-metering device in China [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2023(16): 136-138. (in Chinese)

[8] 韩丹丹, 王清, 颜君坤, 等. 气吸式绿豆密植精量排种器的优化与试验[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(9): 147-157.
HAN Dandan, WANG Qing, YAN Junkun, et al. Optimization and experiment of an air-suction mung bean precision seed-metering device[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(9): 147-157. (in Chinese)

[9] 崔涛, 韩丹丹, 殷小伟, 等. 内充气吹式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 8-16.
CUI Tao, HAN Dandan, YIN Xiaowei, et al. Design and experiment of inside-filling air-blowing maize precision seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 8-16. (in Chinese)

[10] 黄金路. 气压式玉米精量排种器的设计与试验[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022.
HUANG Jinlu. Design and experimental research of the pneumatic maize precision seed-metering device[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[11] 贾洪雷, 张胜伟, 陈天佑, 等. 丘陵坡地自吸式绿豆精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 51-60.
JIA Honglei, ZHANG Shengwei, CHEN Tianyou, et al. Design and experiment of self-suction mung bean precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 51-60. (in Chinese)

[12] FENG D, SUN X, LI H, et al. Optimized design of the pneumatic precision seed-metering device for carrots[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024, 16(6): 134-147.

[13] HAN D, ZHANG D, JING H, et al. DEM-CFD coupling simulation and optimization of an inside-filling air-blowing maize precision seed-metering device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150: 426-438.

[14] 耿端阳, 张明源, 何珂, 等. 倾斜双圆环型孔圆盘式玉米排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 68-76.
GENG Duanyang, ZHANG Mingyuan, HE Ke, et al. Design and experiment of declined disc plate with double ring corn metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 68-76. (in Chinese)

[15] 李玉环, 杨丽, 韩英, 等. 勺夹式蚕豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 108-116.
LI Yuhuan, YANG Li, HAN Ying, et al. Design and experiment of spoon-clamping type metering device for faba beans[J].

Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 108 – 116. (in Chinese)
[16] 侯守印, 邹震, 魏志鹏, 等. 柔性机械式大豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 77 – 86,108.
HOU Shouyin, ZOU Zhen, WEI Zhipeng, et al. Design and experiment of flexible mechanical soybean precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 77 – 86,108. (in Chinese)
[17] 唐汉. 波纹曲面指夹式玉米精量排种器设计及其机理研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018
TANG Han. Study on design and mechanism of corn precision seed discharging device with corrugated curved finger clip[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[18] 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 CSAE, 2017, 33(8): 37 – 46. (in Chinese)
[19] 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 CSAE, 2014, 30(8): 40 – 48. (in Chinese)
[20] 李威, 徐浩, 李晓红, 等. 水平圆盘式大豆单粒精密排种器的设计与试验[J]. 农机化研究, 2024, 46(6): 109 – 115.
LI Wei, XU Hao, LI Xiaohong, et al. Design and experiment of horizontal disc soybean single-grain precision seed metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(6): 109 – 115. (in Chinese)
[21] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米排种器清种机构参数化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 47 – 56.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Parametric design and test of seed cleaning mechanism of air-suction maize seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 47 – 56. (in Chinese)
[22] 李玉环, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米精量排种器双侧清种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 29 – 39.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of double-side clearing mechanism for air-suction maize seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 29 – 39. (in Chinese)
[23] 言育谦, 刘立晶, 刘云强, 等. 蔬菜气吸式排种器四级清种机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊1): 57 – 65.
YAN Yuqian, LIU Lijing, LIU Yunqiang, et al. Design and test of four-stage seed cleaning mechanism for air-suction vagetables seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 57 – 65. (in Chinese)
[24] 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 CSAE, 2019, 35(23): 9 – 20. (in Chinese)
[25] 谢东波, 张春岭, 吴晓庆, 等. 扰种齿辅助气吸式大蒜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 47 – 57.
XIE Dongbo, ZHANG Chunling, WU Xiaoqing, et al. Design and test of garlic seed placer with seed disturbing tooth assisted air suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 47 – 57. (in Chinese)
[26] 李帅奇, 王应彪, 李玮, 等. 山地水平圆盘式排种器设计及 EDEM 仿真试验[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(14): 183 – 190.
LI Shuaiqi, WANG Yingbiao, LI Wei, et al. Design and EDEM simulation test of mountain horizontal disc seeder[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(14): 183 – 190. (in Chinese)
[27] 孙其诚,王光谦. 静态堆积颗粒中的力链分布[J]. 物理学报, 2008,57(8): 4667 – 4674.
SUN Qicheng, WANG Guangqian. Force distribution in static granular matter in two dimensions[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(8): 4667 – 4674. (in Chinese)
[28] 王峰霞. 圆盘型孔式精密排种器的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
WANG Fengxia. The study on disc-shaped hole precision metering mechansim[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
[29] 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.
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 CSAE, 2024, 40(7): 50 – 60. (in Chinese)
[30] 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)
[31] 程晓辉. 丘陵山区小型播种机的设计[D]. 南昌: 江西农业大学, 2011.
CHENG Xiaohui. The design of small seeder machine in hilly area[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2011. (in Chinese)