doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.09.017

基于行星齿轮驱动的增扰促充式玉米高速精密排种器设计与试验

赵一鸣[1]　杨幼铭[1]　贾　宪[1]　伍景涛[1]　董建鑫[2]　黄玉祥[1]

(1. 西北农林科技大学机电工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 针对机械式玉米精密排种器在高速作业条件下漏播、卡种等问题,提出一种基于行星齿轮驱动的增扰促充式玉米精密排种器。该装置采用 NGW 行星轮系传动,在行星轴上布置扰种环,对充种区内种群施加反向差速扰动以强化充种过程。通过对充种过程进行理论建模与动力学分析,确定了影响充种效果的主要因素及关键部件的结构参数。基于 Box－Behnken 试验设计,以扰动长度、扰种棒数量和工作速度为试验因素,以合格率、重播率和漏播率为评价指标,开展三因素三水平响应面试验,并进行充种性能对比验证。试验结果表明,当扰动长度为 30 mm、扰种棒数量为 3 个、工作速度为 12 km/h 时,合格率为 92.61%,重播率为 3.95%,漏播率为 3.46%。田间验证结果表明,在上述最优参数组合下,合格率为 91.42%,重播率为 4.35%,漏播率为 4.23%,满足机械式玉米精密播种的作业要求。研究结果可为高速机械式玉米精密排种器的结构设计与参数优化提供参考。

关键词: 玉米; 精密排种器; 机械式; 行星齿轮驱动; 增扰促充

中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)09-0184-13　　**OSID**:

Design and Experiment of Planetary Gear Driven Disturbance Assisted High Speed Precision Seed-metering Device for Maize

ZHAO Yiming[1]　YANG Youming[1]　JIA Xian[1]　WU Jingtao[1]　DONG Jianxin[2]　HUANG Yuxiang[1]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 010018, *China*)

Abstract: Mechanical maize precision seed meters operating at high forward speeds are prone to seed leakage and blockage. To address these problems, a planetary gear driven disturbance-assisted precision seed metering device was developed. The device adopted an NGW-type planetary gear train, and an agitator ring mounted on the planetary shafts imposed reverse differential disturbance on the seed population in the filling zone to enhance the seed-filling process. By establishing a theoretical model and performing dynamic analysis of the seed-filling process, the main influencing factors and structural parameters of the key components affecting filling performance were determined. Based on the Box－Behnken design, a three-factor, three-level response surface experiment was conducted, with agitation length, number of disturbing rods and forward speed as experimental factors, and qualified rate, multiple rate and leakage rate as evaluation indices. Comparative tests on seed-filling performance were also carried out. The results showed that the optimal parameter combination was agitation length of 30 mm, three disturbing rods and forward speed of 12 km/h, under which the qualified rate, multiple rate and leakage rate were 92.61%, 3.95% and 3.46%, respectively. Field validation under the same parameter combination yielded qualified rate of 91.42%, multiple rate of 4.35% and leakage rate of 4.23%, satisfying the operational requirements for mechanical precision maize seeding. The findings provided theoretical and technical support for the structural design and parameter optimization of high-speed mechanical maize precision seed metering devices.

Key words: maize; precision seed-metering device; mechanical type; planetary gear driven; disturbance assisted filling

收稿日期: 2025－11－18　修回日期: 2025－12－17

基金项目: 国家自然科学基金项目(32372009)和国家重点研发计划项目(2021YFD2000405、2021YFD2000404)

作者简介: 赵一鸣(2000—),男,博士生,主要从事现代农业装备研究,E-mail: zym0130@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 黄玉祥(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤-机器系统研究,E-mail: hyx@nwsuaf.edu.cn

0　引言

玉米作为全球重要的粮食作物和饲料来源，其产量水平直接关系国家粮食安全和畜牧业发展[1-2]。精密播种技术在满足农艺要求的前提下，通过对播种密度、株行距和播深进行精准控制，实现行距一致、粒距均匀和播深稳定，可显著降低用种量、减少间苗等田间作业，提升出苗整齐度和群体质量，是保障玉米稳产增产的关键技术途径[3]。随着农业生产规模化、集约化程度不断提高，播种环节对作业效率的要求日益增加，高速作业逐渐成为播种机械发展的重要方向[4]。

目前，主流玉米精密排种器主要包括机械式和气力式两类。气力式排种器在较高作业速度下具有较好的充种性能，但存在结构复杂、能耗偏高以及对籽粒形状和尺寸适应性有限等问题[5]。机械式排种器结构简单、可靠性高、成本较低，在国内应用最为广泛。然而，在作业速度提高时，传统机械式排种器充种时间明显缩短，种箱内籽粒易发生堆积和架空，导致型孔充填稳定性下降，表现为排种合格率降低，重播、漏播率增加[6]。因此，如何突破高速作业条件下种群流动性差与充种效率低的技术瓶颈，实现高速与精密的协同，已成为当前机械式排种器设计与优化研究中亟待解决的核心问题。

为改善充种区内种群的流动特性，提高充种效率，学者普遍尝试通过增强扰动来破坏籽粒间的受限状态。JIA 等[7]在大豆凸勺式排种器中增设搅种机构，改善了种群流动性和充填稳定性；都鑫等[8]通过在排种盘内布置扰种条并优化其结构参数，提高了型孔充种率；李兆东等[9]采用槽齿组合式吸种盘，对种群施加定向扰动，通过匹配槽齿结构与转速，降低了漏吸概率；针对高速条件下供种不稳定的问题，李晓冉等[10]设计螺旋斜置式柔性搅种装置，兼顾扰动范围与籽粒损伤控制；张明华等[11]提出带坡度扰种条的气吸轮式排种器，在破除种群堆积的同时引导籽粒定向流向吸孔区域，提高了吸附效率和播种均匀性。总体来看，已有研究多集中于气力式排种器的扰动机理与结构优化，且所设计的扰动机构通常与种盘同步运动，二者间相对运动有限，对种层的实际扰动强度和充种过程的促进作用仍然不足。在高速作业条件下，漏充问题仍然难以有效解决，从而制约了机械式玉米精密排种器作业精度的进一步提升[12-13]。

为此，本文设计一种基于行星齿轮驱动的增扰促充式玉米高速精密排种器。该装置采用 NGW 行星轮系，利用扰种环与种盘之间的反向、异速相对运动，在充种区构建时变扰动场，对型孔上方种群进行持续激活与促充，从而改善高速条件下的充种工况。

1　整机结构与工作原理

1.1　整机结构

增扰促充式玉米高速精密排种装置的整体结构如图 1 所示，主要由后壳体、行星架、输入轴、行星轴、太阳轮、行星轮、内齿圈、导种轮、递种隔板、种盘、扰种环、入种盖等部件组成。扰种环套设在 4 根均布的行星轴上构成扰种机构，相对于种盘呈反向、异速转动，在充种区内形成持续变化的干涉流场，有效破除种群堆积。扰种环与种盘上的取种单元共同构成增扰促充工作区，是排种装置的关键部件。

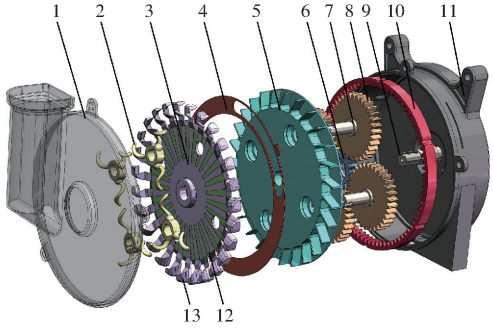


图 1　排种器整体结构示意图

Fig. 1　Schematic of overall structure of seed metering device

1. 入种盖　2. 扰种环　3. 种盘　4. 递种隔板　5. 导种轮　6. 太阳轮　7. 行星轴　8. 行星轮　9. 驱动轴　10. 内齿圈　11. 后壳体　12. 导种槽　13. 型孔

1.2　工作原理

排种器的工作原理如图 2 所示，整机工作过程可分为充种、清种、递种、导种和投种 5 个阶段。作业时，播种机上的电机或地轮通过传动装置驱动种盘及行星轮系转动，扰种环随行星轮系转动，在其作用下，充种区内种群堆积被破坏，种子被拨入各单元型孔；当取种单元转至一定角度后，多余种子在自重作用下从型孔中滑落，仅保留单粒种子。单粒种子随种盘继续转动至上方，通过隔板开口递入后方导种轮的导种槽内。导种轮与种盘同步旋转，将导种槽中的种子输送至右下方的投种口，种子在重力及初速度共同作用下落入导种管内，从而完成单粒精量排种过程。

2　关键部件设计

2.1　籽粒形状特征

玉米籽粒的几何形态与尺寸参数是精密排种器结构设计与参数匹配的基础。合理的籽粒形状参数有助于提高型孔与籽粒的匹配性，减少重播和漏播现象，保证播种质量[14]。本研究选取我国种植面积

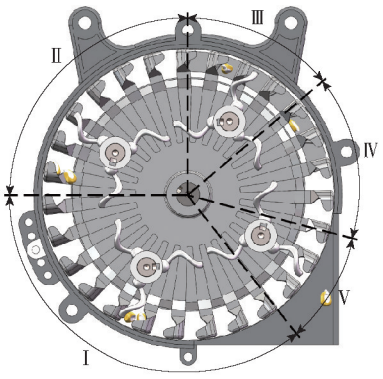
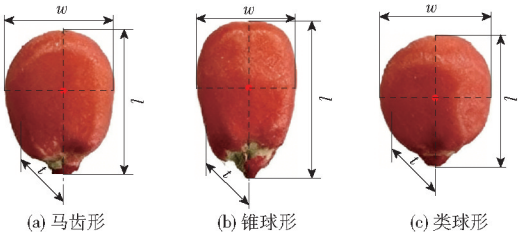


图 2 排种器工作原理图

Fig. 2 Schematic of working principle of seed metering device

Ⅰ. 充种区 Ⅱ. 清种区 Ⅲ. 递种区 Ⅳ. 导种区 Ⅴ. 投种区

较大且适宜机械精量播种的郑单 958 玉米一级种为研究对象。根据形态特征将籽粒分为马齿形、锥球形和类球形 3 类,数量比例约为 6∶3∶1。分别随机选取各类型籽粒 100 粒,利用三维扫描仪获取其外形点云数据,并以籽粒质心为原点建立三维坐标系,其中 x、y、z 轴分别对应籽粒长度、宽度和厚度方向(图 3)。在此基础上统计得到各类籽粒的三维尺寸分布范围,如表 1 所示,用于后续单元型孔和排种盘结构参数设计。



(a) 马齿形 (b) 锥球形 (c) 类球形

图 3 种子尺寸

Fig. 3 Seed sizes

表 1 种子尺寸参数

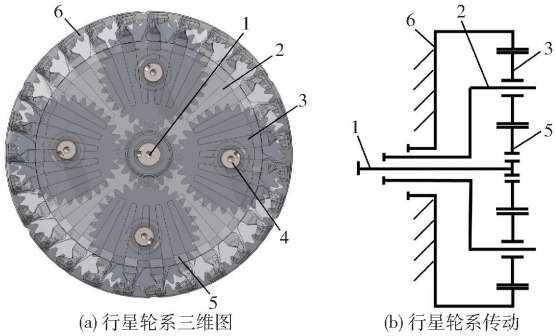
Tab. 1 Seed parameters mm

类型	参数	数值
马齿形	长度	10.68 ~ 13.39
	宽度	7.63 ~ 10.11
	厚度	3.91 ~ 6.17
锥球形	长度	11.05 ~ 13.92
	宽度	6.02 ~ 9.55
	厚度	4.25 ~ 8.36
类球形	长度	7.72 ~ 9.88
	宽度	7.61 ~ 10.18
	厚度	7.41 ~ 9.28

2.2 NGW 行星轮系

2.2.1 结构设计与工作原理

排种器传动系统采用 NGW 行星轮系。内齿圈固定在壳体上;种盘与行星架采用一体化设计,排种盘即为行星架,同时作为动力输入构件;太阳轮作为惰轮,仅参与啮合传动。行星轮均布安装在行星轴上,与太阳轮外啮合、与内齿圈内啮合,构成同轴紧凑的双啮合行星传动系统。系统传动关系如图 4 所示。



(a) 行星轮系三维图 (b) 行星轮系传动

图 4 行星轮系示意图

Fig. 4 Schematics of planetary gear system

1. 输入轴 2. 排种盘(行星轮) 3. 行星轮 4. 行星轴 5. 太阳轮 6. 内齿圈

动力由驱动轴输入至行星架,在内齿圈固定条件下,行星架带动行星轮产生公转和自转的复合运动。行星轴上布置扰种环组件,利用行星轮的复合运动在充种区内形成时变干涉场,从而在种盘与扰种环之间建立同轴差动的相对运动关系。通过输出构件的联接方式和传动路径设计,使扰种环相对于种盘呈反向、异速的运动特性,为增扰促充提供动力基础。

2.2.2 运动学建模

为建立传动系统的速度约束关系,采用以行星架为载体的相对运动分析方法。对于 NGW 行星轮系,太阳轮与行星轮为外啮合副,内齿圈与行星轮为内啮合副,其在载体坐标下满足 Willis 速度关系,即

$$\frac{n_s - n_c}{n_r - n_c} = -\frac{Z_r}{Z_s} \tag{1}$$

式中 n_s——太阳轮转速,r/min

n_r——内齿圈转速,r/min

n_c——行星架/排种盘转速,r/min

Z_s——太阳轮齿数

Z_r——内齿圈齿数

结合本装置工况条件,内齿圈固定($n_r = 0$),行星架提供输入转速 n_c。将 n_r 代入式(1)并整理,得

$$i = \frac{n_s}{n_c} = 1 + \frac{Z_r}{Z_s} \tag{2}$$

式中 i——传动比

行星轮的自转由内外啮合副在载体系中的相对速度约束联合确定。以内外啮合副为对象,可得到速度兼容关系

$$\begin{cases} (n_s - n_c) Z_s + n_p Z_p = 0 \\ (n_r - n_c) Z_r - n_p Z_p = 0 \end{cases} \tag{3}$$

式中　Z_p——行星轮齿数

n_p——行星轮/扰种环转速，r/min

联立式(1)、(3)可得

$$n_p = -\frac{Z_r}{Z_p}n_c \tag{4}$$

式(4)表明行星轮相对行星架的自转方向与行星架相反，其转速与齿数比以及输入转速 n_c 成正比。结合式(2)与式(4)，可归纳得到 n_s 与 n_c 同向异速，n_p 与 n_c 反向且异速。因此，当需要在排种盘周向上引入与其反向、可调幅值的扰动运动时，可通过调节齿数组合或末级速比实现目标。由于排种器尺寸固定，故采用调整扰种环上扰种棒数量来调节扰动幅值。

2.2.3　参数设计

在 NGW 行星轮系的设计过程中，齿轮参数的选取不仅决定传动的运动学特性和速比关系，也直接影响啮合精度、载荷分配以及装配工艺性[15]。基于机械式排种器低速、轻载及结构紧凑的工作特性，齿轮材料为 40CrMo，模数 m 取值范围为 1 ~ 3 mm，精度等级按 ISO 1328 标准设定为 9 级。受整机几何尺寸约束，内齿圈分度圆直径 d_r 固定为 205 mm。为优化扰动场覆盖范围，确保充种均匀性，行星轮数量 C_s 设定为 4。为保证传动系统的可制造性、装配性及运行稳定性，其齿数设计需同时满足以下 4 个几何与装配约束条件：①内齿圈齿形需满足可测性条件，即齿顶圆半径不得小于基圆半径，否则会造成齿槽宽度非单调变化，导致齿形量杆无法进入齿槽，出现齿顶和齿根干涉。由齿轮几何关系可得

$$\begin{cases} d_a \geqslant d_b \\ d_a = mZ_r + 2mh_a^* \\ d_b = mZ_r\cos\alpha \end{cases} \tag{5}$$

式中　d_a——内齿圈齿顶圆半径，mm

d_b——内齿圈基圆半径，mm

h_a^*——齿顶高系数

α——压力角，(°)

联立可得内齿圈齿形设计需满足

$$1 + \frac{2h_a^*}{Z_r} \geqslant \cos\alpha \tag{6}$$

②内外啮合齿轮的中心距应完全一致，以确保行星轴轨迹为同心圆并避免啮合干涉，即要求

$$Z_r = Z_s + 2Z_p \tag{7}$$

③为使多个行星轮能同时与太阳轮和内齿圈正确啮合并实现周向均布，需满足行星轮的装配闭合条件

$$\frac{Z_r - Z_s}{C_s} = k \quad (k \in \mathbf{Z}) \tag{8}$$

④相邻行星轮齿顶圆之间需保持足够的几何间隙，以防止运转时发生碰撞或齿顶干涉。其几何关系为

$$h = R_p\sin\theta_p - 4d_a \geqslant h_{\min} \tag{9}$$

式中　h——相邻行星齿顶直线间隙，mm

R_p——行星中心轨道半径，mm

θ_p——相邻行星中心夹角，(°)

$h_{\min}$——相邻行星齿顶最小间隙

已知 R_p、θ_p 和 d_a 为

$$\begin{cases} R_p = a_s \\ \theta_p = 2\pi/C_s \\ d_a = 4m(Z_p + 2h_a^*) \end{cases} \tag{10}$$

式中　a_s——太阳轮与行星轮节圆中心距，mm

将式(10)代入式(9)中得到

$$m(Z_s + Z_p)\sin\frac{\pi}{C_s} \geqslant m(Z_p + 2h_a^*) + h_{\min} \tag{11}$$

满足上述 4 项约束条件后，经系统配齿计算与参数优化，确定 NGW 行星轮系的主要结构参数如表 2 所示。

表 2　NGW 轮系结构参数

Tab. 2　NGW gear train structural parameters

类别	参数	太阳轮	行星轮	内齿圈
配齿参数	齿数 Z	18	32	82
	模数 m/mm	2.5	2.5	2.5
	压力角 α/(°)	20	20	20
	螺旋角 β/(°)	0	0	0
	齿厚 b/mm	15	15	15
	齿顶高系数 h_a^*	1	1	1.109
	齿根高系数 h_f^*	1.25	1.25	1.104
	顶隙系数 c_n^*	0.25	0.25	−0.005
	变位系数 x	0.415	0.295	1.157
直径参数	分度圆直径 d/mm	45	80	205
	基圆直径 d_b/mm	42.29	75.18	192.63
	节圆直径 d'/mm	46.29	82.29	210.87
	齿顶圆直径 d_a/mm	52.08	86.48	205.24
	齿根圆直径 d_f/mm	40.83	75.23	216.30
测量参数	跨齿数 k_0	3	5	11
	公法线长度 w_k/mm	19.79	34.84	82.34
	量棒直径 d_m/mm	5.8	5.5	5.3

2.3　扰种环

2.3.1　结构与参数设计

扰种环是行星齿轮驱动系统的末级执行部件，其功能是将行星轮的公转-自转复合运动转化为对种群的周期性扰动，从而在排种盘同轴空间内实现反向、异速且非稳态的种群活化与促充作用(图 5)。其设计目标是在有限的几何空间内构建均匀分布的动态扰动场，使充种区内颗粒群体始终保持活化状态，减弱静摩擦锁固与结拱现象，提升籽粒流动性与型孔充填均匀性。

为兼顾扰动强度和可靠性，扰种棒选用 70D 硬

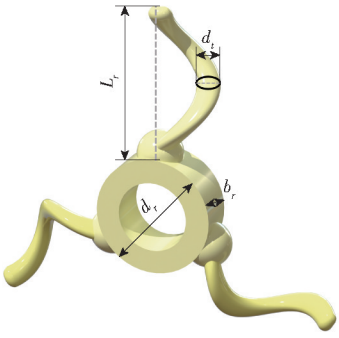


图 5 扰种环结构示意图

Fig. 5 Schematic of agitation ring

度的热塑性聚氨酯(TPU)材料,断裂伸长率大于300%,拉伸强度为 35 MPa。扰种环本体为圆环形结构,直径 d_r 为 25 mm,环厚 b_r 为 10 mm。其周向均布扰种棒组,扰种棒的几何结构直接决定扰动流场的空间特征。本设计采用螺旋型扰种棒,螺旋圈数为 1,其螺距等于扰动长度 L_r,螺旋线直径对应扰种棒直径 d_t。螺旋型扰种棒具有渐变入射角,能够在增强扰动的同时避免严重卡种,使扰动作用更为平稳。

扰种环与排种盘之间的反向差速运动在孔口处形成周期性剪切场。以扰种棒端部为分析对象,则扰种棒与排种盘间切向相对速度为

$$v_t = \frac{2\pi}{60} | n_c - n_p | L_r \tag{12}$$

式中 v_t——扰种棒与排种盘间切向相对速度,m/s

该相对速度决定了扰动区域的剪切强度,进而影响颗粒间的流化程度。较高的相对速度可提高种群的局部动能,但过大则可能导致颗粒反弹与孔口扰乱。

扰种棒单位时间扫掠体积为

$$V_e = N_r \pi d_t L_r v_t \tag{13}$$

式中 V_e——扫掠体积,m^3

N_r——扰种棒数量

由式(13)可知,V_e 与 L_r 和 d_t 均成正比,但两者在促充机理中的作用不同。长度 L_r 直接决定扰动覆盖范围与能量穿透深度,是影响促充效率的主要几何因子;而直径 d_t 主要影响颗粒接触力与局部剪切速率,对整体扰动场分布的影响相对较弱。

扰动长度 L_r 的确定需同时满足覆盖性、无干涉与几何约束。由图 6 分析可得,其设计需满足

$$\begin{cases} L_r < \dfrac{d_z - (d_s + d_p + d_r)}{2} \\ L_r < \dfrac{\sqrt{2}(d_s + d_p)}{4} \\ L_r > d_x \end{cases} \tag{14}$$

式中 d_z——排种盘直径,mm

d_s——太阳轮分度圆直径,mm

d_x——型孔与种盘连接点直径,mm

代入参数可得扰种棒有效长度 L_r 合理范围为 20 ~ 32.5 mm,该区间既满足结构装配要求,又能确保产生有效扰动。

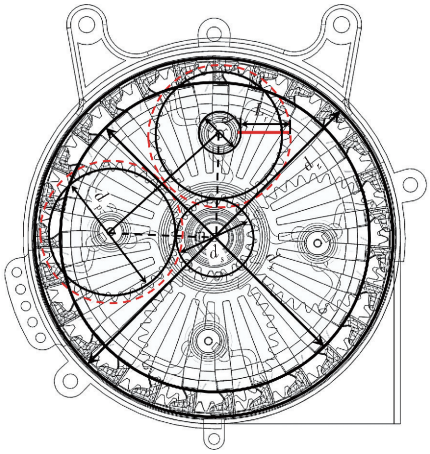


图 6 扰动长度分析图

Fig. 6 Agitation length analysis

扰种棒直径受排种盘与壳体间空间限制。直径过大时,行星轴可能与入种盖或型孔发生干涉,导致扰种环过厚、与排种盘之间易产生卡种。结合玉米籽粒平均尺寸,d_t 取 6 mm。

扰种环通过平键与行星轮同轴固定,随行星轮自转。由于行星轮在 NGW 行星齿轮系中进行复合运动,其自转方向与排种盘(行星架)相反且转速不同,因此扰种环相对于排种盘呈反向、异速的相对运动特性。这种差动关系使扰种棒端部在排种盘孔口上方形成周期性扫掠。当扰种棒逆向掠过孔口区域时,其切向分量产生剪切力和扰动力,持续扰动孔口上方的籽粒群体,促使籽粒滚动、滑移并重新分布,从而破坏静止颗粒结构、增强颗粒流动。该过程可视为在型孔上方施加时变促充扰动场,有效降低孔口处颗粒堆积密度和接触应力,使籽粒更易进入孔口,实现高效充种(图 7)。

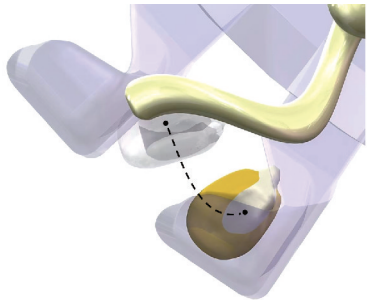


图 7 充种过程

Fig. 7 Seed-filling process

扰种环的扰动频率为

$$f_d = \frac{N_r | n_p - n_c |}{60} \tag{15}$$

式中　f_d——扰动频率，Hz

由 2.2.2 节可得排种盘和扰种环的转速比，代入式(15)可得

$$f_d = \frac{N_r n_c (Z_r - Z_p)}{60 Z_p} \tag{16}$$

由此可得扰动频率与扰种棒数量、排种盘转速成正比。

2.3.2　受力分析

扰种环的旋转在充种区内形成周期性载荷扰动，使籽粒间的接触力呈动态变化，其表达式为

$$F_i = F_0 + \Delta F \sin(\omega_p t) \tag{17}$$

式中　F_i——籽粒间的瞬时接触力，N

F_0——平均静态接触力，N

ΔF——扰动幅值，N

ω_p——扰动角频率，rad/s

t——扰动时间，s

该周期性的载荷波动不断破坏型孔口上方籽粒的静摩擦网络，使籽粒体系保持流化状态，从而提高充填能力与充种均匀性。

为进一步揭示扰种环在充种区内的促充机理，以充种区单颗籽粒为研究对象建立受力模型(图 8)。

扰种棒逆时针旋转时，其端部对籽粒施加合力 F_r，该合力可分解为法向分量 F_t 与切向分量 F_n。其中，F_t 垂直于接触面，主要产生挤压与冲击作用，用来破坏籽粒间的静摩擦锁固和拱桥结构；F_n 沿扰种棒运动方向作用，驱动籽粒产生滚动与滑移，使其进入型孔实现充种。籽粒同时受到支撑力 F_s、摩擦力 f、向心力 F_c 和重力 G。根据静力平衡条件，可分别

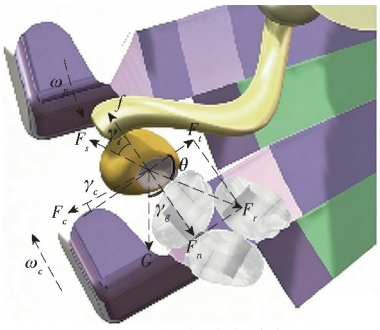


图 8　充种受力分析

Fig. 8　Force analysis of seed filling process

在切向与法向方向上建立受力方程，即

$$\begin{cases} F_n + G\sin\gamma_g = F_s\cos\gamma_s + F_c\cos\gamma_c + f \\ F_t + F_s\sin\gamma_s = G\cos\gamma_g + F_c\sin\gamma_c \end{cases} \tag{18}$$

式中　γ_g——重力相对于法线方向夹角，(°)

γ_s——支撑力相对法线方向夹角，(°)

γ_c——向心力相对法线方向夹角，(°)

将合力分解后代入式(18)，得

$$\begin{cases} F_r\sin\theta = F_s(\cos\gamma_s + \mu)\cos\gamma_s + m_0\omega_s^2 r\cos\gamma_c - m_0 g\sin\gamma_g \\ F_r\cos\theta = m_0 g\cos\gamma_g + m_0\omega_s^2 r\sin\gamma_c - F_s\sin\gamma_s \end{cases} \tag{19}$$

式中　θ——合力方向角，(°)

μ——摩擦因数

m_0——籽粒质量，kg

g——重力加速度，m/s^2

ω_s——扰种棒旋转角速度，rad/s

γ——籽粒回转半径，即质心到扰种棒旋转轴线垂直距离，mm

由此得到扰种棒对籽粒的总作用力及合力方向角为

$$\begin{cases} F_r = \sqrt{[F_s(\cos\gamma_s + \mu) + m\omega_s^2 r\cos\gamma_c - mg\sin\gamma_g]^2 + (mg\cos\gamma_g + m\omega_s^2 r\sin\gamma_c - F_s\sin\gamma_s)^2} \\ \theta = \arctan\dfrac{F_s(\cos\gamma_s + \mu) + m\omega_s^2 r\cos\gamma_c - mg\sin\gamma_g}{mg\cos\gamma_g + m\omega_s^2 r\sin\gamma_c - F_s\sin\gamma_s} \end{cases} \tag{20}$$

式(20)表明扰种棒对籽粒的合力由扰动角速度、重力分量、向心力及邻近籽粒的支撑力共同决定；θ 大小决定了促充作用的性质。当 θ 处于适宜范围时，法向分量既能有效破坏静态结构，又不会导致过度冲击，而切向分量可充分激发籽粒滚动与滑移，二者共同作用实现对孔口上方种群的高效促充。

2.4　排种盘

排种盘在本研究中兼作行星架，与行星齿轮驱动系统同轴联接，既承担动力输入，又直接参与籽粒分配(图 9)。排种盘直径直接决定取种单元的数量与分布特征，是影响排种器作业性能的关键结构参数。

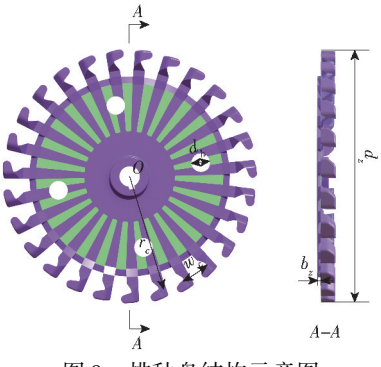


图 9　排种盘结构示意图

Fig. 9　Schematic of seeding plate

为分析排种盘直径 d_z 对充种时间 t 的影响，根据几何关系可得

$$\begin{cases} v_c t = l \\ v_c = \dfrac{n_c \pi d_z}{60} \\ l = \alpha_f r_c \end{cases} \tag{21}$$

式中 v_c——排种盘线速度,m/s

l——充种区弧长,mm

α_f——充种区弧度,rad

r_c——型孔中心处半径,mm

整理可得

$$t = \frac{60\alpha_f r_c}{n_c \pi d_z} \tag{22}$$

式(22)表明,充种时间 t 与充种区弧度 α_f 成正比,与排种盘直径 d_z 和转速 n_c 成反比。即在排种盘转速恒定条件下,增大直径可显著延长充种区弧长,从而增加充种时间,提升充种充分性与清种可靠性。同时较大的排种盘直径允许布置更多取种单元,在保证排量的前提下降低排种器工作转速,改善系统运行平稳性。因此,在结构尺寸与安装空间允许的条件下,应优先选择较大的排种盘直径,以在充种性能与排种精度之间实现最优平衡。

本设计中,排种盘圆环直径 d_z 为 225 mm,厚度 b_z 为 3 mm。四周均布 4 个行星轴孔,其直径 d_h 为 17 mm。各个取种单元间布置深 0.3 mm 导种槽以便将籽粒高效导入取种单元。

取种单元数量为

$$N_k = \frac{2\pi r_c}{w_c} \tag{23}$$

式中 N_k——取种单元数量

w_c——取种单元间隔,mm

已知型孔中心处半径 r_c 为 105 mm,w_c 需大于 1.5 倍最大种子长度,否则会阻碍充种[16]。统计籽粒尺寸可得 w_c 大于 22.4 mm,故 w_c 取 24 mm。代入式(23)可得 N_k 为 27.49,取整设计 27 个取种单元。

可得排种盘转速与工作速度关系为

$$n_c = \frac{2\,500 v_m}{3 N_k z} \tag{24}$$

式中 v_m——工作速度,km/h

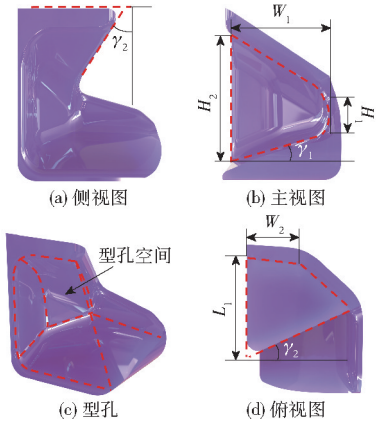
z——播种株距,mm

已知 z 为 25 mm,计算得到高速工况下(8 ~ 20 km/h)种盘转速范围为 20 ~ 50 r/min。

2.5 单元型孔

单元型孔结构直接决定排种器的充种与清种性能。需要保证在清种阶段后,每个型孔内只留下单粒种子,因此必须结合籽粒形状尺寸和充种姿态进行参数设计。

型孔结构示意图如图 10 所示,型孔槽的基本尺寸包括入口宽度 W_1、内部宽度 W_2、壁高 H_1、深度 H_2、长度 L_1、底部倾角 γ_1 和进入角 γ_2,参数的取值需根据有效充种情况确定。

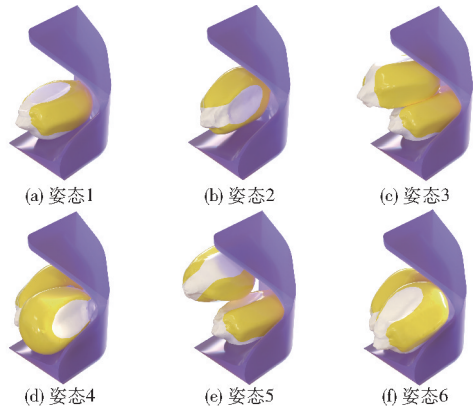


(a) 侧视图 (b) 主视图 (c) 型孔 (d) 俯视图

图 10 单元型孔示意图

Fig. 10 Schematics of seed-taking unit

如图 11 所示,有效充种姿态分别为单粒种子横向充入型孔、单粒种子纵向充入型孔、双粒种子均横向充入型孔、双粒种子均纵向充入型孔、一横向种子和一纵向种子横向充入型孔、一横向种子和一纵向种子纵向充入型孔。



(a) 姿态1 (b) 姿态2 (c) 姿态3 (d) 姿态4 (e) 姿态5 (f) 姿态6

图 11 有效充种姿态

Fig. 11 Effective filling postures

由此可以推导得到型孔结构参数取值范围为

$$\begin{cases} 0 \leqslant H_1 \leqslant t_0 \\ 0 \leqslant H_2 \leqslant t_0 + w_0 \\ 0 \leqslant W_1 \leqslant (t_0 + w_0)\cos\gamma_1 \\ 0 \leqslant W_2 \leqslant t_0 \\ 0 \leqslant L_1 \leqslant l_0 \end{cases} \tag{25}$$

式中 l_0——玉米籽粒最大长度,mm

w_0——玉米籽粒最大宽度,mm

t_0——玉米籽粒最大厚度,mm

底部倾角 γ_1 直接影响充种口的开口形态,进而决定种子的充填姿态:若 γ_1 过大,则种子姿态与型孔难以匹配;若 γ_1 过小,则易引发多粒重充现象。进入角 γ_2 则决定了充种后对种子的约束力:γ_2 过大

会导致清种困难；γ_2过小则可能造成合格种子被误清。基于文献[17]、种子尺寸范围及公式(25)的计算，最终优化确定了取种单元的各关键参数，其最优值如表 3 所示。

表 3　型孔结构参数

Tab. 3　Structural parameters of seed-taking unit

参数	W_1/mm	W_2/mm	H_1/mm	H_2/mm	L_1/mm	γ_1/(°)	γ_2/(°)
数值	12	5.5	5	13	8	20	22

3　台架试验

3.1　试验条件

排种器台架性能优化试验于 2025 年 8 月 23 日在西北农林科技大学农业装备工程中心进行。试验选用未分级的郑单 958 玉米种子作为研究对象。排种器中齿轮采用精密磨齿加工，扰种环为 3D 打印 TPU，壳体为铝合金机加工。试验依托自主搭建的试验台架与数据采集系统进行。其中，驱动电机调速范围为 0 ~ 50 r/min，通过链轮、链条及传动轴驱动排种器。输送装置包含 PVC 材质输送带与配备铸铝基座的 60 W 永磁电机，其线速度可在 0 ~ 16 km/h 范围内无级调节，以模拟不同机具前进速度。数据采集系统包括高速摄像机(Revealer, M230M/C)和运动分析软件(Tracker)，具体布置如图 12 所示。

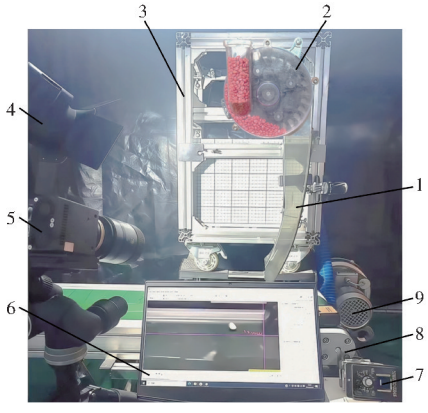


图 12　排种器试验台架

Fig. 12　Test bench of seed metering device

1. 导种管　2. 排种器　3. 台架　4. 高光灯　5. 高速摄像机　6. 计算机　7. 调速器　8. 输送带　9. 电机

试验采用高速摄影技术记录排种过程。高速摄像机镜头光轴与传送带承接面保持水平。镜头中心点与传送带表面的垂直距离控制在 15 cm 左右，同时调整 FOV(视场范围)，使视场右侧边缘与导种管出口外沿呈相切关系，以确保能够完整捕捉种子落入传送带的初始状态。图像采集系统的参数设定如下：分辨率为 720 像素，采样帧率设定为 480 f/s。为消除设备启动与停止阶段的不稳定因素对试验结果的影响，单次视频采集时长需覆盖超过 250 粒种子的连续排放周期。在样本选取上，截取视频流稳定段落中间排出的 250 粒种子作为有效统计样本，以进行后续的粒距特征分析。在数据处理阶段，将采集的视频文件导入 Tracker 运动分析软件。利用软件内置的标尺校准功能，确立图像像素与物理尺寸的比例关系，从而获取精确的排种粒距数据(图 13)。

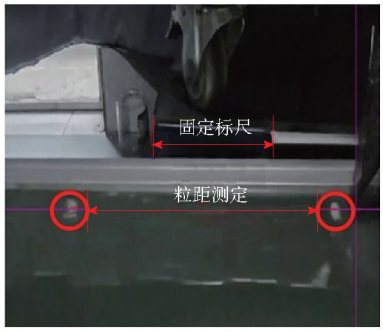


图 13　高速摄影数据采集

Fig. 13　High-speed photography data acquisition

3.2　评价指标

结合排种器作业过程中扰种环对种子扰动和促充作用特点，选取扰动长度、扰种棒数量和工作速度为试验因素。试验按照 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》国家标准要求进行。以合格率 A、重播率 D 和漏播率 M 作为评价指标。选取玉米播种株距为 25 cm，以稳定作业状态下排种器排出 250 粒种子的间距作为试验样本。为确保试验结果的准确性，每组试验重复 3 次取均值。

3.3　单因素试验

为合理选择各试验因素的取值范围，参考已有排种器结构参数并结合实际工作条件进行单因素试验[18]。在扰种棒数量为 3 个、工作速度 12 km/h 的条件下，对扰动长度分别为 26、28、30、32、34 mm 时进行试验；在扰动长度 30 mm、工作速度 12 km/h 的条件下，对扰种棒数量分别为 1、2、3、4、5、6 个时进行试验；在扰动长度 30 mm、扰种棒数量为 3 个的条件下，对工作速度分别为 8、10、12、14、16 km/h 时进行试验。根据单因素试验结果绘制得到变化曲线，如图 14 所示。

由图 14a 可知，当扰动长度由 26 mm 增加到 30 mm 时，合格率大幅提升，漏播率与重播率显著降低；而当扰动长度继续增至 34 mm 时，合格率下降，重播与漏播现象加剧。这一变化趋势表明，扰动长度过短时对种群扰动不足，易导致充种不充分而漏播；扰动长度过长则扰动作用区域偏离孔口，种子运动轨迹被扰乱，引发重播与漏播。扰动长度在 28 ~

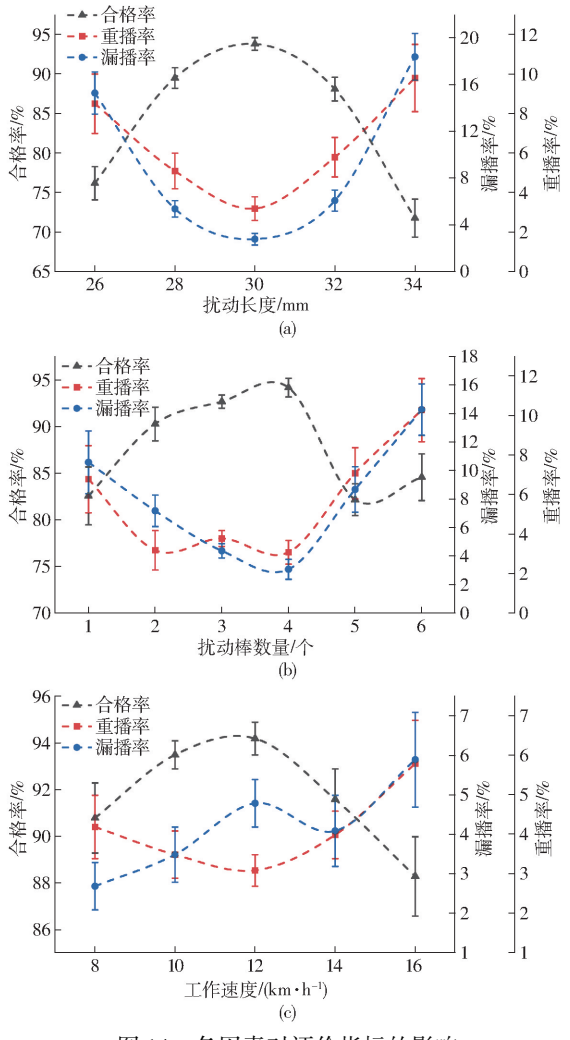


图 14 各因素对评价指标的影响

Fig. 14 Influence of each factor on evaluation indicators

32 mm 范围内排种性能较好。由图 14b 可得,当扰种棒数量由 1 个增至 4 个时,合格率持续提升,同时漏播率降低,此阶段因扰动范围扩大与均匀性改善,种群流动性增强,充种效果显著优化。当扰种棒数量增至 5 个时,合格率急剧下降,漏播率升高,重播率同步增加,这是过度扰动引发种子流动空间压缩及无效碰撞频发导致。扰种棒数量为 6 个时,漏播率进一步增高,表明过度扰动效应加剧,作业稳定性显著降低。为确保排种器高速作业下的高性能与稳定性,扰种棒数量的范围确定为 2 ~ 4 个。由图 14c 可得,合格率随速度提升先增后降,于 12 km/h 时达到最大值,该速度下重播率亦最低。值得注意的是,漏播率随速度变化呈现独特趋势:在 8 km/h 时漏播率最低,随速度增加至 12 km/h 时漏播率升高,之后在 16 km/h 时达到最高。这是因为 8 km/h 时种子充种时间充裕,故漏播较少,但易因种群流动性不足而产生局部重播;当速度提升至 10 ~ 12 km/h 时,适度的离心力与扰动协同作用有效优化了种群流化态,使充种更为均匀,故合格率最高且重播率最低,但充种时间的缩短导致漏播风险略有增加;当速度超过 14 km/h 后,过短的充种时间与过大的离心力共同导致种子运动轨迹紊乱,种群稳定性被破坏,致使重播与漏播现象同步加剧,合格率显著下降。为在较高合格率与较低重播率之间取得最佳平衡,工作速度范围确定为 10 ~ 14 km/h。

3.4 Box - Behnken 响应面试验

3.4.1 试验设计

根据单因素试验结果,确定扰动长度为 28 ~ 32 mm,扰种棒数量为 2 ~ 4 个,工作速度为 10 ~ 14 km/h。采用 Box - Behnken 设计方法[19],以扰动长度、扰种棒数量、工作速度为试验因素,进行三因素三水平正交试验。试验因素编码如表 4 所示。

表 4 试验因素编码

Tab. 4 Horizontal coding of test factors

编码	因素		
	扰动长度 x_1/mm	扰种棒数量 x_2/个	工作速度 x_3/(km·h^{-1})
-1	28	2	10
0	30	3	12
1	32	4	14

3.4.2 结果分析

利用 Design-Expert 10.0.3 软件生成 17 组试验方案并完成台架试验,得到合格率 Y_1、重播率 Y_2 和漏播率 Y_3 的试验结果,如表 5 所示,表中 X_1、X_2、X_3 为因素编码值。

表 5 试验设计与结果

Tab. 5 Test design and results %

序号	因素			Y_1	Y_2	Y_3
	X_1	X_2	X_3			
1	0	0	0	92.36	4.04	3.60
2	1	1	0	90.79	4.10	5.11
3	0	-1	1	90.51	5.06	4.43
4	-1	1	0	88.58	6.40	5.02
5	-1	0	1	89.08	6.63	4.29
6	0	0	0	92.44	4.09	3.47
7	0	0	0	93.02	3.46	3.52
8	-1	-1	0	89.99	5.28	4.73
9	0	0	0	92.11	4.54	3.35
10	1	-1	0	89.12	6.14	4.74
11	0	-1	-1	88.97	5.61	5.42
12	1	0	-1	88.22	6.45	5.33
13	0	0	0	92.73	3.78	3.49
14	0	1	-1	88.84	5.54	5.62
15	0	1	1	90.15	5.08	4.77
16	1	0	1	89.74	5.13	5.13
17	-1	0	-1	87.94	6.05	6.01

(1)合格率模型建立与分析

对合格率进行二次回归方程分析,见表 6。并

表 6　合格率方差分析

Tab. 6　Analysis of variance for qualified rate

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	45. 15	9	5. 02	59. 69	<0. 000 1 **
X_1	0. 649 8	1	0. 649 8	7. 73	0. 027 3 *
X_2	0. 006 6	1	0. 006 6	0. 078 7	0. 787 2
X_3	3. 8	1	3. 8	45. 16	0. 000 3 **
X_1X_2	2. 37	1	2. 37	28. 22	0. 001 1 **
X_1X_3	0. 036 1	1	0. 036 1	0. 429 5	0. 533 2
X_2X_3	0. 013 2	1	0. 013 2	0. 157 4	0. 703 4
X_1^2	15. 08	1	15. 08	179. 39	<0. 000 1 **
X_2^2	4. 38	1	4. 38	52. 1	0. 000 2 **
X_3^2	15. 12	1	15. 12	179. 86	<0. 000 1 **
残差	0. 588 3	7	0. 084		
失拟项	0. 094 8	3	0. 031 6	0. 256 2	0. 853 9
纯误差	0. 493 5	4	0. 123 4		
总和	45. 74	16			

注：** 表示影响极显著（$P \leqslant 0.01$），* 表示影响显著（$0.01 < P < 0.05$），下同。

以合格率 Y_1 为响应值，建立二次多项回归方程

$$Y_1 = 92.53 + 0.285X_1 - 0.028\,7X_2 + 0.688\,8X_3 + 0.77X_1X_2 + 0.095X_1X_3 - 0.057\,5X_2X_3 - 1.89X_1^2 - 1.02X_2^2 - 1.89X_3^2 \quad (26)$$

根据表 6 合格率方差分析可知，该回归模型极显著（$P \leqslant 0.01$），且失拟项不显著（$P > 0.05$），说明模型拟合较优，能较为直观地拟合试验结果。其中决定系数 R^2 为 0. 987 1，变异系数为 0. 321 2%，校正决定系数 R^2_{Adj} 为 0. 970 6，表明模型具有较高的相关性和解释能力，可用于合格率的预测与分析。

分析合格率回归模型可知，X_3、X_1^2、X_2^2、X_3^2、X_1X_2 对合格率影响极显著，X_1 对合格率的影响显著，其他项均不显著。试验因素影响合格率的主次顺序为：X_3、X_1、X_2。X_1X_2 交互作用对合格率影响的响应曲面如图 15 所示。

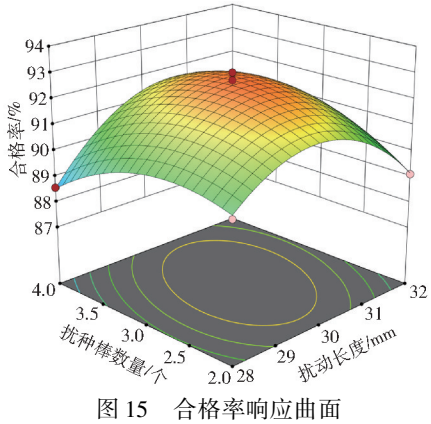


图 15　合格率响应曲面

Fig. 15　Quality rate response surface

由图 15 可知，当工作速度为 12 km/h，随着扰动长度从 28 mm 增至 32 mm 以及扰种棒数量从 2 个增至 4 个，合格率均呈先升后降趋势，并在扰动长度 30 mm、扰种棒数量 3 个附近达到峰值。这是由于在低扰动水平下，装置对种群的剪切作用有限，易形成结拱或流变死区，导致种群流动性不足，限制了型孔充填；随扰动参数增大，死区被有效破坏，种群流化程度改善，显著提升了充种性能。但当扰动长度过长或扰种棒数量过多时，会赋予种子过大的切向动能，引发触孔反弹与飞溅现象，且密集的机械搅动会导致种间干涉加剧，破坏了充种轨迹的稳定性，导致合格率下降。

（2）重播率模型建立与分析

对重播率进行二次回归方程分析，见表 7。以重播率 Y_2 为响应值，建立二次多项回归方程

$$Y_2 = 3.49 + 0.032\,5X_1 + 0.15X_2 - 0.47X_3 + 0.02X_1X_2 + 0.38X_1X_3 + 0.035X_2X_3 + 0.772X_1^2 + 0.642X_2^2 + 0.932X_3^2 \quad (27)$$

表 7　重播率方差分析

Tab. 7　Analysis of variance for multiple rate

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	15. 43	9	1. 71	15. 84	0. 000 7 **
X_1	0. 806 4	1	0. 806 4	7. 45	0. 029 4 *
X_2	0. 117 6	1	0. 117 6	1. 09	0. 331 9
X_3	0. 382 8	1	0. 382 8	3. 54	0. 102 1
X_1X_2	2. 5	1	2. 5	23. 06	0. 002 **
X_1X_3	0. 902 5	1	0. 902 5	8. 34	0. 023 4 *
X_2X_3	0. 002	1	0. 002	0. 018 7	0. 895 1
X_1^2	5. 28	1	5. 28	48. 81	0. 000 2 **
X_2^2	0. 600 8	1	0. 600 8	5. 55	0. 050 7
X_3^2	3. 9	1	3. 9	36. 05	0. 000 5 **
残差	0. 757 9	7	0. 108 3		
失拟项	0. 118 2	3	0. 039 4	0. 246 3	0. 058 2
纯误差	0. 639 7	4	0. 159 9		
总和	16. 19	16			

由表 7 重播率方差分析可知，该回归模型极显著（$P \leqslant 0.01$），且失拟项不显著（$P > 0.05$），说明模型拟合较优，能较为直观地拟合试验结果。其中决定系数 R^2 为 0. 953 2，变异系数为 6. 4%，校正决定系数 R^2_{Adj} 为 0. 893，由此可得模型误差较小，且相关性和解释度都较好，能够正确反映预测指标与各因素间关系。由重播率回归模型可知，X_1^2、X_3^2、X_1X_2 对重播率影响极显著，X_1、X_1X_3 对重播率影响显著，其他项均不显著。试验因素影响重播率的主次顺序为：X_1、X_3、X_2。X_1X_2 和 X_1X_3 交互作用对重播率影响的响应曲面如图 16 所示。

由图 16a 可知，扰动长度为 29 ~ 31 mm、扰种棒数量为 2 ~ 4 个时重播率较低。当工作速度为 12 km/h，扰种棒数量一定时，重播率随扰动长度的

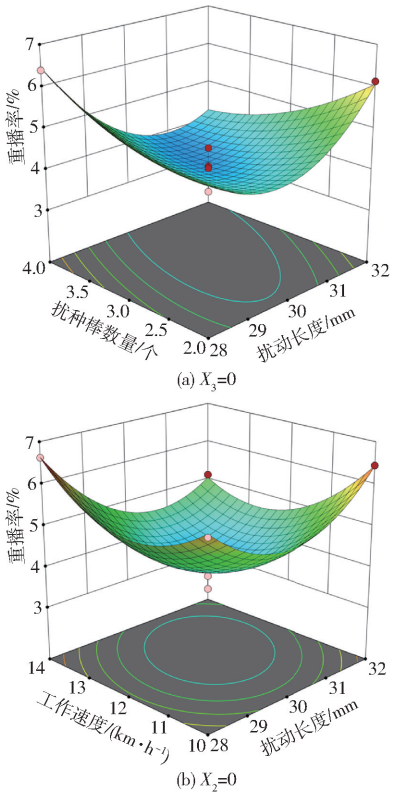


图 16 重播率响应面

Fig. 16 Multiple rate response surfaces

增加呈先快速降低后缓慢升高趋势,这是因为较短的扰动长度无法有效打破种子间的团聚与结拱,导致多粒种子以粘连状态同时充入型孔。随着扰动长度增加,种群分散性改善,重播率降低,但过长的扰动长度会产生过大的冲击动能,引起导种区种子运动紊乱,干扰清种过程,甚至将已被剔除的多余种子再次强行带入型孔,致使重播率回升;当扰动长度在 30 ~ 32 mm 区间时,重播率随扰种棒数量增加呈降低趋势。这是因为增加扰种棒数量显著提高了对种群的扰动频率,有效消除了相邻两次扰动间隙的种群沉降与死区,使充种区种子始终维持理想的流化离散状态,避免了因局部堆积压实而导致的多粒卡种现象,从而有利于降低重播率。

由图 16b 可知,扰动长度为 29 ~ 31 mm、工作速度为 11 ~ 13 km/h 时重播率较低。当扰种棒数量为 3 个,重播率随扰动长度和工作速度的增加均呈先降低后升高的趋势。这是由于在低参数水平下,扰动装置对种群的剪切分散能力较弱,且低速下种群内摩擦较大,种子易以团聚状态充入型孔,导致重播率较高;随着参数适度增加,种群流化与离散程度改善,重播率降低;但当参数过大时,过长的扰动长度引起充种区种子运动紊乱,干扰正常清种轨迹,而过高的工作速度产生强大的离心力,将多余种子紧压于型孔边缘,增大了脱离阻力,加之清种时间窗口缩短,致使重播率显著回升。

(3)漏播率模型建立与分析

对漏播率进行二次回归方程分析,见表 8。以漏播率 Y_3 为响应值,建立二次多项回归方程

$$Y_3 = 3.98 - 0.317\,5X_1 - 0.121\,2X_2 - 0.218\,8X_3 - 0.79X_1X_2 - 0.475X_1X_3 + 0.022\,5X_2X_3 + 1.12X_1^2 + 0.377\,7X_2^2 + 0.962\,8X_3^2 \quad (28)$$

表 8 漏播率方差分析

Tab. 8 Analysis of variance for leakage rate

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	11.34	9	1.26	245.24	<0.000 1 **
X_1	0.008 4	1	0.008 4	1.64	0.240 5
X_2	0.18	1	0.18	35.03	0.000 6 **
X_3	1.77	1	1.77	343.91	<0.000 1 **
X_1X_2	0.001 6	1	0.001 6	0.311 4	0.594 2
X_1X_3	0.577 6	1	0.577 6	112.4	<0.000 1 **
X_2X_3	0.004 9	1	0.004 9	0.953 6	0.361 3
X_1^2	2.51	1	2.51	488.35	<0.000 1 **
X_2^2	1.74	1	1.74	337.73	<0.000 1 **
X_3^2	3.66	1	3.66	711.75	<0.000 1 **
残差	0.036	7	0.005 1		
失拟项	0.003	3	0.001	0.123 5	0.941 4
纯误差	0.032 9	4	0.008 2		
总和	11.38	16			

由表 8 漏播率方差分析可知,该回归模型极显著($P \leqslant 0.01$),且失拟项不显著($P > 0.05$),说明模型拟合较优,能较为直观地拟合试验结果。其中决定系数 R^2 为 0.996 8,变异系数为 1.56%,校正决定系数 R_{Adj}^2 为 0.892 8,由此可得模型误差较小,能够正确反映预测指标与各因素间关系。

分析漏播率回归模型可知,X_2、X_3、X_1^2、X_2^2、X_3^2、X_1X_3 对漏播率影响极显著,其他项均不显著。试验因素影响漏播率的主次顺序为:X_3、X_2、X_1。

X_1X_3 交互作用对漏播率影响的响应曲面如图 17 所示。由图 17 可知,扰动长度为 28 ~ 31 mm、工作速度为 11 ~ 14 km/h 时漏播率较低。当扰种棒数量一定时,漏播率随扰动长度的增加呈先迅速降

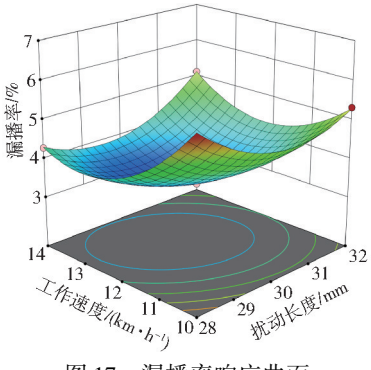


图 17 漏播率响应曲面

Fig. 17 Leakage rate response surface

低后缓慢升高的趋势。这是因为扰动长度较短时，扰动范围有限，无法有效破坏充种区远端的种群结拱与相对静止的死区，导致部分型孔因种群流动性差而未能捕获种子。随着扰动长度增加，死区被消除，漏播率降低。但当扰动长度过长时，扰种棒末端线速度过大，对种子的冲击动能显著增加，极易将孔口附近即将充入的种子击飞，或因运动轨迹干扰阻碍种子正常入孔，致使漏播率回升。

3.5　参数优化

根据回归方程模型，以合格率 Y_1 最大、重播率 Y_2 和漏播率 Y_3 最小值为优化目标，构建多目标优化模型

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \min Y_3 \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{29}$$

优化后得到：当扰动长度为 30.16 mm、扰种棒数量为 3.008 个、工作速度为 12.37 km/h 时，合格率为 92.61%、重播率为 3.95%、漏播率为 3.46%。考虑工程实现性，将最优解修正为扰动长度 30 mm、扰种棒数量 3 个、作业速度 12 km/h，以此作为排种器的推荐参数组合。

3.6　验证试验

基于台架测试得到数据，于 2025 年 9 月 25 日在山东省潍坊市潍柴雷沃智慧农业科技有限公司试验田进行验证试验，试验田总面积为 6 667 m^2，土壤类型为棕壤土。为避免振动对排种器作业性能影响，选取平整且松软地块进行试验，如图 18 所示。根据实际作业条件，将参数设定为扰动长度 30 mm、扰种棒数量 3 个、作业速度 12 km/h，在此工况下进行 3 次平行试验，试验结果见表 9。田间试验测得合格率为 91.42%，重播率为 4.35%，漏播率为 4.23%。与台架试验预测值相比，3 项指标误差均较小。虽然田间非结构化环境（如振动、地面不平、速度波动）与实验室理想环境之间存在客观差异导致了少量误差，但整体结果证实了预测值和试验值之间的良好相关性。



图 18　田间验证试验

Fig. 18　Field validation test

表 9　参数验证结果

Tab. 9　Verification results of optimized parameters

%

参数	试验组	试验值	平均值
合格率	1	92.17	91.42
	2	91.13	
	3	90.96	
重播率	1	4.42	4.35
	2	4.14	
	3	4.49	
漏播率	1	3.82	4.23
	2	4.31	
	3	4.56	

查阅文献[20]得到传统机械式排种器（勺轮式和指夹式）在工作速度 12 km/h 下的作业指标。对 3 种排种器进行参数对比，见表 10。由表 10 可知，高速工况下该行星增扰式排种器合格率显著优于勺轮式和指夹式排种器。其漏播率大幅低于对比机型，证明增扰机构有效解决了高速充种难题，且重播率控制优异，综合性能满足高速精密播种要求。

表 10　排种效果对比

Tab. 10　Comparison of seed metering performance

%

类型	Y_1	Y_2	Y_3
行星增扰式	91.42	4.35	4.23
勺轮式	84.50	6.80	8.70
指夹式	82.80	4.38	12.82

4　结论

（1）针对传统机械式玉米精密排种器在高速作业条件下易出现漏充、卡种等问题，提出并研制了一种基于 NGW 行星轮系的行星齿轮驱动增扰促充式玉米精密排种器。该装置通过在行星轴上布置扰种环，在充种区内构建反向、异速的时变扰动场，以强化种群流动和型孔充填过程。

（2）根据玉米精密排种器排种过程的理论分析与作业需求，选取扰动长度、扰种棒数量和工作速度为主要可调工作参数。单因素试验结果表明，其较优工作范围分别为 28～32 mm、2～4 个、10～14 km/h。采用响应曲面分析了各因素对排种性能的影响，得出影响合格率的因素由大到小依次为工作速度、扰动长度、扰种棒数量；影响重播率的因素由大到小依次为扰动长度、工作速度、扰种棒数量；影响漏播率的因素由大到小依次为工作速度、扰动棒数量、扰动

长度。

(3) 对回归模型进行多目标优化与田间验证,得到了最佳工作参数组合为:扰动长度 30 mm、扰种棒数量 3 个、工作速度 12 km/h,该条件下的合格率为 91.42%、重播率为 4.35%,漏播率为 4.23%,与预测值误差较小,验证了模型和优化结果的可靠性,能够满足机械式玉米高速精密播种的作业要求。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] YANG Shuo, ZHAI Changyuan, GAO Yuanyuan, et al. Planting uniformity performance of motor-driven maize precision seeding systems[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(5):101 - 108.

[3] YANG Li, YAN Bingxin, YU Yiming, et al. Global overview of research progress and development of precision maize planters[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(1):9 - 26.

[4] 王金武, 唐汉, 关睿, 等. 动定指勺夹持式玉米精量排种器优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12):48 - 57.
WANG Jinwu, TANG Han, GUAN Rui, et al. Optimization design and experiment on clamping static and dynamic finger-spoon maize precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12):48 - 57. (in Chinese)

[5] 徐国立,杨发展,赵烁,等. 气吸式排种器研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(9):58 - 63.
XU Guoli, YANG Fazhan, ZHAO Shuo, et al. Research status and development trend of air-suction seed dispenser[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(9):58 - 63. (in Chinese)

[6] 和贤桃,齐浩君,张东兴,等. 丘坡地水平圆盘式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1):151 - 163.
HE Xiantao, QI Haojun, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of horizontal disc maize precision seed metering device on hilly land[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1):151 - 163. (in Chinese)

[7] JIA Honglei, CHEN Yulong, ZHAO Jiale, et al. Design and key parameter optimization of an agitated soybean seed metering device with horizontal seed filling[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(2):76 - 87.

[8] 都鑫,刘彩玲,姜萌,等. 自扰动内充型孔轮式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13):23 - 34.
DU Xin, LIU Cailing, JIANG Meng, et al. Design and experiment of self-disturbance inner-filling cell wheel maize precision seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(13):23 - 34. (in Chinese)

[9] 李兆东,杨文超,张甜,等. 油菜高速精量排种器槽齿组合式吸种盘设计与吸附性能试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1):12 - 22.
LI Zhaodong, YANG Wenchao, ZHANG Tian, et al. Design and suction performance test of sucking-seed plate combined with groove-tooth structure on high speed precision metering device of rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1):12 - 22. (in Chinese)

[10] 李晓冉,廖庆喜,廖宜涛,等. 稻麦油兼用高速气送集排器螺旋斜置式搅种装置研制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(4):51 - 61.
LI Xiaoran, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Development of the spiral-inclined seed stirring equipment in high-speed air-assisted centralized metering for rice, wheat, and rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(4):51 - 61. (in Chinese)

[11] 张明华,罗锡文,王在满,等. 水稻直播机组合型孔排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9):29 - 36.
ZHANG Minghua, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of combined hole-type metering device of rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):29 - 36. (in Chinese)

[12] 张学军,程金鹏,史增录,等. 摆动夹取式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4):38 - 50.
ZHANG Xuejun, CHENG Jinpeng, SHI Zenglu, et al. Simulation and experiment of seed taking performance of swing-clamp type maize precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4):38 - 50. (in Chinese)

[13] 董建鑫,高筱钧,张仕林,等. 玉米姿控驱导式排种器导向投种机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10):25 - 34.
DONG Jianxin, GAO Xiaojun, ZHANG Shilin, et al. Design and test of guiding seed throwing mechanism for maize posture control and driving metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10):25 - 34. (in Chinese)

[14] VARELA J I, MILLER N D, INFANTE V, et al. A novel high-throughput hyperspectral scanner and analytical methods for predicting maize kernel composition and physical traits[J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132912.

(下转第 288 页)

Iberoamerican Knowledge Graphs and Semantic Web Conference. Cham: Springer International Publishing, 2021: 47 - 60.
[21] JARNAC L, CHABOT Y, COUCEIRO M. Uncertainty management in the construction of knowledge graphs: a survey[J]. arXiv Preprint, arXiv:2405.16929, 2024.
[22] NEUBERGER J, DOLL L, ENGELMANN B, et al. Leveraging data augmentation for process information extraction[C]// International Conference on Business Process Modeling, Development and Support. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 57 - 70.
[23] YOU M, YIN J, WANG H, et al. A knowledge graph empowered online learning framework for access control decision-making [J]. World Wide Web, 2023,26(2):827 - 848.
[24] 李剑宇,岳昆. 知识图谱中的关联实体发现[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2021,43(6):1079 - 1085.
LI Jianyu, YUE Kun. Discovering association entities in Knowledge Graph[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2021, 43(6): 1079 - 1085. (in Chinese)
[25] SHAHRIAR S, LUND B D, MANNURU N R, et al. Putting GPT - 4o to the sword: a comprehensive evaluation of language, vision, speech, and multimodal proficiency[J]. Applied Sciences, 2024, 14(17): 7782.
[26] GLM T, ZENG A, XU B, et al. Chatglm: a family of large language models from glm - 130b to GLM - 4 all tools[J]. arXiv preprint, arXiv:2406.12793, 2024.
[27] HUANG L, YU W, MA W, et al. A survey on hallucination in large language models: principles, taxonomy, challenges, and open questions[J]. ACM Transactions on Information Systems, 2025, 43(2): 1 - 55.
[28] CHHABRA S, SINGH A K. Dynamic resource allocation method for load balance scheduling over cloud data center networks [J]. Journal of Web Engineering, 2021, 20(8): 2269 - 2284.

(上接第 196 页)

[15] 张晓君,于晓光. 考虑啮合相位差的行星齿轮传动非线性振动特性分析[J]. 机械设计, 2025, 42(9):144 - 150.
ZHANG Xiaojun, YU Xiaoguang. Analysis on nonlinear vibration characteristics of planetary gear transmission with mesh phase difference taken into consideration[J]. Journal of Mechanical Design, 2025, 42(9):144 - 150. (in Chinese)
[16] 董建鑫,高筱钧,张仕林,等. 高速播种机玉米姿控驱导式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11):108 - 119.
DONG Jianxin, GAO Xiaojun, ZHANG Shilin, et al. Design and test of maize posture control and driving precision metering device for high-speed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11):108 - 119. (in Chinese)
[17] DONG J, GAO X, ZHENG Z, et al. Design and testing of a posture-adjusting precision metering device for high-speed maize planting[J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16:1458597.
[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)
[19] 陈俊志,史瑞杰,戴飞,等. 移动式制种玉米剥皮机设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(5):331 - 342.
CHEN Junzhi, SHI Ruijie, DAI Fei, et al. Design and experiment of mobile seed corn husker[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5):331 - 342. (in Chinese)
[20] 董建鑫. 玉米机械式高速精密排种器调姿促充与导向匀投机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.
DONG Jianxin. The mechanism of posture adjustment for seed-filling and guidance for uniform seed throwing of the mechanical high-speed precision maize metering device[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2025. (in Chinese)