

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S1.007

超级杂交稻压电振动式匀种装置设计与试验

刘彩玲 李方林 袁昊 贾旋 周智智

(中国农业大学工学院,北京 100083)

摘要: 针对目前振动式水稻育秧盘低播量精量排种器存在匀种均匀性差、难以提供单列稳定种子流的问题,设计了一种压电振动式匀种装置。通过对压电振子振动原理、振动板动力学和水稻种子转向等分析,确定了各部件的结构参数。进行振动板结构参数优化设计,以储种盒深度、转向槽角度以及振动方向角为试验因素,结合 Box - Behnken 试验方案进行优化,试验结果表明转向槽角度、储种盒深度、振动方向角和转向槽角度交互作用对试验结果影响显著,当储种盒深度为 8 mm、转向槽角度为 49°、振动方向角为 29°时,种子均匀性变异系数为 17.91%。通过台架试验测定振动板加速度,确定输入电压与振幅之间的关系。最优结构参数下振动板匀种试验结果表明,匀种均匀性变异系数、播种合格率和漏播率分别为 18.20%、94.65% 和 0.67%。不同匀种速度下播种性能试验结果表明,当工作电压为 130 ~ 180 V 时,其播种合格率均不小于 94.17%,漏播率均不大于 0.83%。不同水稻品种适应性试验结果表明,在工作电压 130、150、170 V 下,其播种合格率均不小于 94.17%,漏播率均不大于 1.0%,满足超级杂交水稻精量化育秧播种要求。

关键词: 超级杂交稻; 压电; 振动; 匀种装置; 离散元法

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0058-11

Design and Experiment of Piezoelectric Vibration Seed Homogenizer for Super Hybrid Rice

LIU Cailing LI Fanglin YUAN Hao JIA Xuan ZHOU Zhizhi
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problems of poor uniformity of low sowing quantity precision metering device of vibrating rice seedling tray at present, which is difficult to provide a single row of stable seed flow, a piezoelectric vibrating homogenizing device was designed. The structural parameters of each component were determined by analyzing the vibration principle of piezoelectric vibrator, the dynamics of vibrating plate and the steering of rice seeds. The structural parameters of the vibrating plate were optimized. Taking the depth of the seed storage box, the angle of the steering groove and the direction of vibration as the test factors, the optimization test was carried out in combination with the Box - Behnken test scheme. The results showed that the interaction of the angle of the steering groove, the depth of the seed storage box, the direction of vibration and the angle of the steering groove had a significant impact on the test results. When the depth of the seed storage box was 8 mm, the angle of the steering groove was 49°, and the direction of vibration was 29°, and the coefficient of variation of seed evenness was 17.91%. The relationship between the input voltage and the amplitude was further determined by the acceleration measurement bench test. Under the optimal structural parameters, the variation coefficient of uniformity, the qualified rate of sowing and the missed rate of sowing were 18.20%, 94.65% and 0.67%, respectively. The seeding performance test at different uniform seeding speeds showed that when the working voltage was 130 ~ 180 V, the qualified seeding rate was no less than 94.17% and the missed seeding rate was no more than 0.83%. The adaptability test results of different rice varieties showed that under the three working voltages of 130 V, 150 V and 170 V, the qualified seeding rate was no less than 94.17%, and the missed seeding rate was less than or equal to 1.0%, which met the requirements of precision seedling raising and sowing of super hybrid rice.

Key words: super hybrid rice; piezoelectric; vibration; seed homogenizer device; discrete element method

收稿日期: 2022-06-18 修回日期: 2022-08-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175261)

作者简介: 刘彩玲(1972—),女,副教授,博士生导师,主要从事农业机械与农业装备研究,E-mail: cailingliu@163.com

0 引言

超级杂交稻强调少本稀植,其种植农艺要求为每穴 1~2 株^[1-4],实现超级杂交稻工厂化育秧过程的低播量精量播种是实现单株栽插的前提,也是超级杂交稻育秧环节需要重点解决的问题之一。

目前水稻育秧盘低播量精量排种主要采用振动式排种器^[5-8]。国内学者研究表明,带有匀种功能的振动式排种器具有结构简单、功耗低、对种子损伤小、适应性强、工作效率高等优点,特别是对流动性差的非圆水稻种子,易于在摩擦振动作用下形成有序均匀种子流,是一种适合超级杂交稻精量播种的有效方法^[9-13]。针对振动匀种过程,李志伟等^[14]提出一种一体多通道式振动板,采用电磁激振方式,改变激振频率和输入电压,优化了槽板匀种过程;鹿芳媛等^[15]利用离散元法研究了槽型通道结构与稻种匀种稳定性之间的关系,优化 V-T 型振盘的振频和振幅,提高了匀种质量;王朝辉等^[16]提出一种气吸滚筒和振动匀种相结合的播种方式,优化了种层高度和振动频率,提高了播种合格率。现有振动式排种器均采用一体多通道式振动板结构^[17],各通道内存在种子重叠、匀种均匀性差的问题,降低了播种精度。

为提高低播量下振动排种器的精密播种性能,本文提出一种压电振动式匀种装置,对其进行结构设计、仿真优化与台架试验,实现单列种子流的有序均匀输送,为超级杂交稻精密播种提供一种新的振动匀种方法。

1 压电振动式装置结构与工作原理

压电振动匀种装置主要由安装块、弹簧板、振动板、3 层压电振子和底座等组成,其结构如图 1 所示。工作时,压电振子在交流电作用下,产生周期性弯曲振动,水稻种子在振动板表面槽型的约束下,逐渐形成单列稳定连续输送的种子流。

2 关键部件设计

2.1 压电振子单体结构设计

压电振子作为振动元件,其激振原理为 2 个极性相反的压电陶瓷片伸缩振动合成的弯曲振动,将 2 个极性相反的压电陶瓷材料用粘合剂粘在一起,在电场作用下上层材料发生伸张形变,下层材料发生压缩形变,整体发生弯曲形变。为增加压电陶瓷材料的坚固性,用锰钢材料固定压电陶瓷,组成 3 层压电振子,如图 2 所示。 l_w 为压电振子宽度。

为确定其结构参数,将 3 层压电振子简化为梁

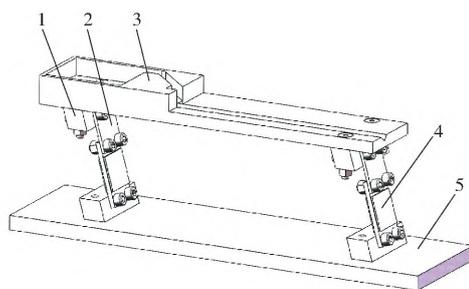


图 1 压电振动式匀种装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of piezoelectric vibrating seed homogenizer

1. 安装块 2. 弹簧板 3. 振动板 4. 3 层压电振子 5. 底座

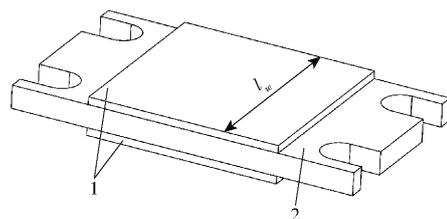


图 2 3 层压电振子结构图

Fig. 2 Structure diagram of three-layer piezoelectric vibrator

1. PZT-52 压电陶瓷片 2. 65Mn 钢

结构^[18],以梁的挠度反映压电振子弯曲性能,探究压电振子结构参数对挠度的影响,以压电振子末端位移 δ 反映梁的挠度,建立数学模型如图 3 所示。

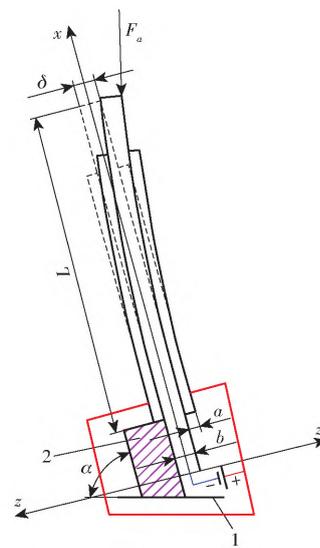


图 3 压电振子数学模型

Fig. 3 Mathematical model of piezoelectric vibrator

1. 支撑板 2. 安装块

对于梁结构,外部施加的力矩与内部抵抗弯曲的力矩相等反向,即

$$M_B - M_D = 0 \tag{1}$$

其中
$$M_B = F_a L \cos \alpha \tag{2}$$

$$M_D = \int_{-a-\frac{b}{2}}^{a+\frac{b}{2}} z T_1 dB \tag{3}$$

$$dB = l_w dz$$

式中 M_B ——外部力矩, N·m

M_D ——内部力矩, $N \cdot m$
 F_a ——外力, N
 L ——压电振子伸出支撑块的距离, m
 a ——压电陶瓷厚度, m
 b ——锰钢厚度, m
 z ——材料发生形变时远离中性层的距离, m
 T_1 ——材料内应力, N
 B ——应力作用面积, m^2
 α ——支撑座与水平面之间的夹角, $(^\circ)$

由压电方程可得

$$S_1 = s_{11} T_1 + d_{31} E_3 \quad (4)$$

式中 S_1 —— x 轴方向的形变量, m

s_{11} ——材料弹性柔顺系数, m^2/N

d_{31} ——材料压电系数, 取 $2.04 \times 10^{-9} m/V$

E_3 ——电场强度, V/m

将式(2)~(4)代入式(1)可得

$$\int_{-a-\frac{b}{2}}^{a+\frac{b}{2}} Y(z) (S_1 - d_{31} E_3) z l_w dz - F_a L \cos \alpha = 0 \quad (5)$$

其中 $Y(z) = 1/s_{11}$

式中 Y ——材料杨氏模量, Pa

则梁的末端位移 δ 为

$$\delta = R \left(1 - \cos \frac{L}{R} \right) \quad (6)$$

其中 $R = z/S_1$

式中 R ——压电材料曲率半径, m

上述结构弯曲变形位移较小, 末端位移可近似为

$$\delta = \frac{L^2}{2R} = \frac{6L^2 [Y_p d_{31} U l_w (a+b) + F_a L \cos \alpha]}{2a Y_p l_w (3b^2 + 6ab + 4a^2) + Y_{Mn} l_w b^3} \quad (7)$$

式中 Y_p ——压电陶瓷材料杨氏模量, 取 $5.9 \times 10^9 Pa$

Y_{Mn} ——65Mn 钢材料杨氏模量, 取 $1.956 \times 10^{11} Pa$

U ——输入电压, V

由式(7)可知, 在距离 L 确定的情况下, 末端位移 δ 与电陶瓷厚度 a 、锰钢厚度 b 有关。目前市场上常用的压电振子长度为 $40 \sim 60 mm$ ^[17], 为降低投种高度, 本文压电振子长度为 $40 mm$, 压电振子与底座的安装长度为 $5 mm$, 则距离 L 为 $35 mm$ 。

为进一步确定末端位移 δ 与压电陶瓷厚度 a 和锰钢厚度 b 关系, 确定 a 和 b 的具体参数, 用 Matlab 绘制其关系如图 4 所示。

由图 4 可知, 压电陶瓷厚度 a 、锰钢厚度 b 均与末端位移 δ 成反比。压电振子末端位移对水稻种子输送有重要影响, 其位移过大将引起水稻种子弹跳, 因此尽量减少两种材料厚度。考虑压电陶瓷与锰钢的制作成本、压电振子整体稳定性、工作过程中不发

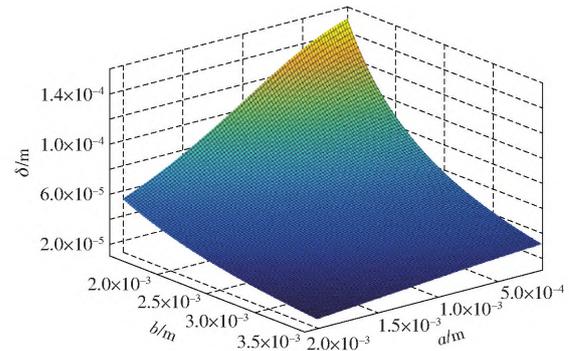


图 4 压电陶瓷厚度 a 和锰钢厚度 b 对末端位移 δ 的影响

Fig. 4 Effect of a and b on end displacement δ

生断裂等问题, 取压电陶瓷厚度 a 为 $1 mm$, 锰钢厚度 b 为 $3 mm$ 。

2.2 振动板结构设计

振动板是水稻种子的直接载体, 其结构参数直接影响种子匀种输送过程, 其结构如图 5 所示, 由储种盒、出口槽、转向槽和 V 形槽构成。种子在板上的运动包括分流阶段 I、转向阶段 II 和输送阶段 III 3 个过程, 种子在 3 层压电振子激励下, 由储种盒分流进入转向槽、V 形槽, 完成单列连续均匀输送。

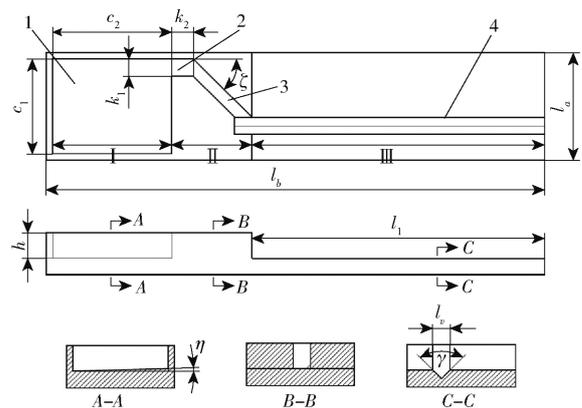


图 5 振动板结构图

Fig. 5 Structural diagram of vibrating plate

1. 储种盒 2. 开口槽 3. 转向槽 4. 输送 V 形槽

I. 分流阶段 II. 转向阶段 III. 输送阶段

以深两优 5814 超级杂交稻种子为研究对象, 统计 1 000 粒水稻种子, 平均尺寸为 $9.87 mm \times 2.78 mm \times 2.39 mm$ 。依据种子形状尺寸设计振动板长 l_b 为 $230 mm$, 宽 l_a 为 $50 mm$, 储种盒壁厚为 $3 mm$, 计算储种盒宽 c_1 为 $44 mm$, 长 c_2 为 $45 mm$ 。为防止种子在开口槽处堵塞, 其宽 k_1 为 $8 mm$, 长 k_2 为 $10 mm$ 。

为增大种子在储种盒中的流动性, 设计储种盒底部倾角 η 为 1.5° , 其剖面 A-A 见图 5^[19]。种层厚度 h 影响种子在储种盒中的流动性, 本文以 3~5 层水稻种子最大厚度为设计依据, 确定 h 范围为 $8 \sim 12 mm$ ^[20]。

输送阶段采用 V 形截面形状, 通过 V 形断面约

束种子姿态实现种子单列排序。V形槽结构参数主要包括槽宽 l_v 、底部倾角 γ 和槽高 h_1 。种子在 V 形槽中的分布呈现 3 种状态：种子短轴与水平方向垂直、长轴与水平方向垂直和长轴与水平方向呈任意 ϕ 角,如图 6 所示。

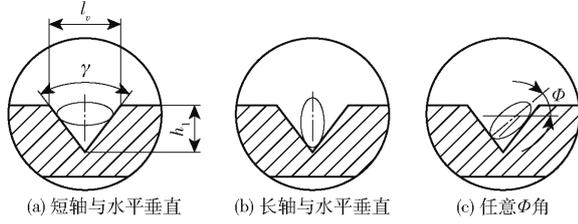


图 6 水稻种子的状态分布

Fig. 6 State distributions of rice seeds

为确保 V 形槽中能容纳单列种子,以不出现两列以上种子为极限,如图 7 所示,图中红色虚线为 V 形槽的上边界,依据前述种子尺寸参数,设计槽高 h_1 为 4 mm;槽宽 l_v 大于种子最大长轴尺寸、小于两个种子最大长轴尺寸,设计其为 6 mm;V 形槽角度 γ 计算式为

$$\gamma = 2\arctan \frac{l_v}{2h_1} \quad (8)$$

由式(8)计算得 γ 为 73.7° 。

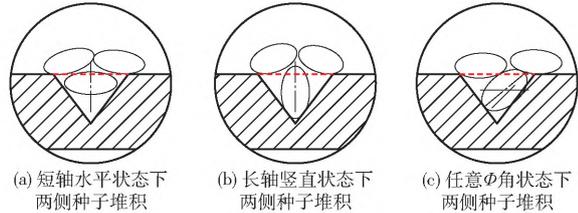


图 7 V 形槽中种子堆积

Fig. 7 Seed accumulation in V-groove

3 振动系统力学分析

3.1 振动系统运动学分析

为研究压电振子振动对振动板和种子输送的影响,对系统进行运动学分析,整个振动系统简化为含有线性阻尼的单自由度定常强迫振动系统^[21],其运动简图如图 8 所示,图中 F_k 和 F_c 分别为系统弹簧力和阻尼力。

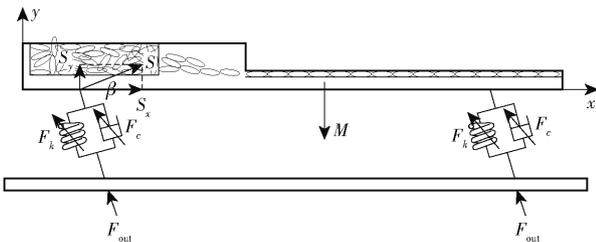


图 8 振动系统

Fig. 8 Vibration system

系统做简谐振动,其运动微分方程为

$$\begin{cases} M\ddot{S} + c\dot{S} + kS = F_{out} \\ F_{out} = F_{max} \cos(\omega t) \end{cases} \quad (9)$$

式中 M ——系统总质量,kg

\ddot{S} ——振动板加速度, m/s^2

\dot{S} ——振动板速度, m/s

S ——振动板位移, m

c ——线性阻尼系数, $N \cdot s/m$

k ——刚度, N/mm

F_{out} ——输入简谐力, N

F_{max} ——简谐力力幅, N

ω ——振动角频率, rad/s

t ——时间, s

令 $p^2 = \frac{k}{M}$, $A = \frac{F_{max}}{k}$, $\xi = \frac{c}{2pM}$, 其中 A 为激励对系

统所产生的最大振幅, ξ 为阻尼比, 可得

$$\ddot{S} + 2\xi p \dot{S} + p^2 S = Ap^2 \cos(\omega t) \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} S = \frac{A_0}{2\xi} (1 - e^{-\xi p t}) \sin(\omega t) \\ A = \frac{A_0 p^2}{\sqrt{p^2 - \omega^2 + (2\xi p \omega)^2}} \end{cases} \quad (11)$$

式中 A_0 ——压电振子振幅, mm

由式(11)可知, 当 $\omega = p$, 此时 $A \approx \frac{A_0}{2\xi}$, 振幅最大。振动板运动方程可简化为

$$S = A \sin(\omega t) \quad (12)$$

将位移沿振动工作面的水平和垂直方向进行分解, 则在 x 和 y 方向上位移 S_x 和 S_y 分别为

$$\begin{cases} S_x = A \cos\beta \sin(\omega t) \\ S_y = A \sin\beta \sin(\omega t) \end{cases} \quad (13)$$

式中 β ——振动方向角, $(^\circ)$

在 x 和 y 方向上速度 v_x 和 v_y 分别为

$$\begin{cases} v_x = A\omega \cos\beta \cos(\omega t) \\ v_y = A\omega \sin\beta \cos(\omega t) \end{cases} \quad (14)$$

在 x 和 y 方向上加速度 a_x 和 a_y 分别为

$$\begin{cases} a_x = -A\omega^2 \cos\beta \sin(\omega t) \\ a_y = -A\omega^2 \sin\beta \sin(\omega t) \end{cases} \quad (15)$$

式(15)表明, 在振动频率一定时, 振幅和振动方向角影响输送速度, 由于振动装置振幅与通电电压呈线性关系^[20], 因此可通过调节输入电压实现振幅的调整。压电振动输送一般采用高频小振幅, 由文献[22]确定后续仿真振幅为 0.12 mm 。

3.2 振动系统动力学分析

3.2.1 种子转向阶段动力学分析

种子在转向槽作用下改变运动方向, 如图 9a 所示。为确定转向槽结构参数, 分析种子在转向槽中

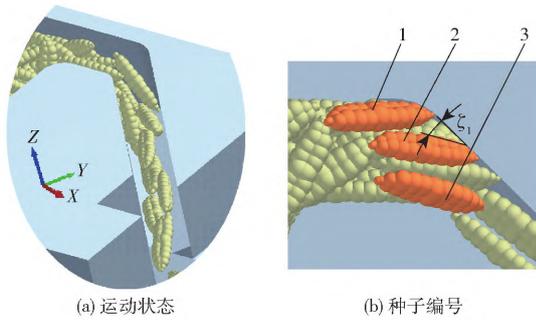


图9 水稻种子在转向槽中的运动示意图
Fig.9 Schematics of rice seed movement in turning trough

的运动。由2.2节可知,开口槽宽度为8 mm,参考种子最大宽度,同一层最多3个水稻种子经开口槽进入转向槽,图9b对水稻种子进行编号。

种子的转向主要发生在 xoy 平面,忽略其他平面受力,其受力分析如图10所示。

图中1、2、3号种子所受的转向力矩分别为

$$\begin{cases} M_1 = \frac{F_{M_y} l}{2} \\ M_2 = \frac{F_{M_y} l}{2} \\ M_3 = F_{M_2} l_x \end{cases} \quad (16)$$

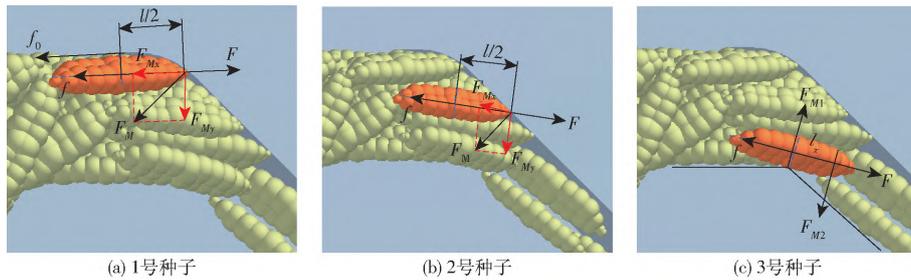


图10 转向槽中水稻种子受力分析

Fig.10 Stress analysis of rice seeds in steering trough

式中 M_1 ——1号种子转向力矩, $N \cdot m$
 M_2 ——2号种子转向力矩, $N \cdot m$
 M_3 ——3号种子转向力矩, $N \cdot m$
 F_{M_y} ——转向槽对种子支持力 F_M 沿短轴分量, N
 F_{M_2} ——其他水稻种子对3号种子支持力, N
 l ——水稻种子长轴, m
 l_x —— F_{M_2} 力臂, m

种子发生转动时,由于其沿长轴方向上的受力不同,导致其进入转向槽后加速度不同形成速度差。由图10可知,1号种子、2号种子、3号种子沿转向槽方向上的加速度分别为

$$\begin{cases} a_1 = \frac{F - f_0 - f - F_{M_x} \cos \zeta}{m} \\ a_2 = \frac{F - f - F_{M_x} \cos \zeta_1}{m} \\ a_3 = \frac{F - f}{m} \cos \zeta_1 \end{cases} \quad (17)$$

式中 a_1 ——1号种子加速度, m/s^2
 a_2 ——2号种子加速度, m/s^2
 a_3 ——3号种子加速度, m/s^2
 F ——激振力沿水稻种子长轴的分量, N
 f ——水稻种子间摩擦力, N
 f_0 ——储种盒对水稻种子的摩擦力, N
 F_{M_x} ——转向槽对种子支持力 F_M 沿长轴的分

量, N

m ——水稻种子质量, kg

ζ ——转向槽角度, $(^\circ)$

ζ_1 ——水稻种子与转向槽间的角度, $(^\circ)$

由式(17)可知,加速度由大到小为 a_3 、 a_2 、 a_1 ,同一层内3个种子在速度差作用下实现转向,依次进入转向槽完成单列输送,如图11所示。

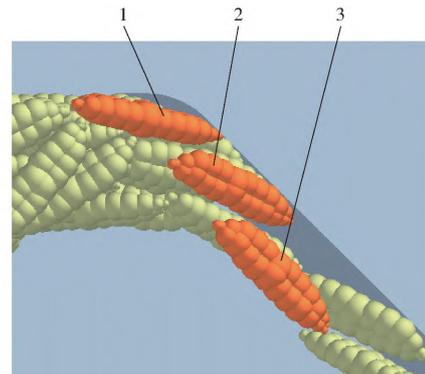


图11 种子运动状态

Fig.11 Seed movement state

1.1号种子 2.2号种子 3.3号种子

由式(17)可知, ζ_1 和 ζ 影响种子加速度和转向,由图11可知, ζ_1 与 ζ 近似相等。为确保水稻种子连续输送,转向槽槽宽取1.5~2个水稻种子的最大宽度,即槽宽 w_d 为4.5~6 mm,如图12所示。

由图12可知, ζ 计算公式为

$$\zeta = \arccos \frac{w_d}{k_1} \quad (18)$$

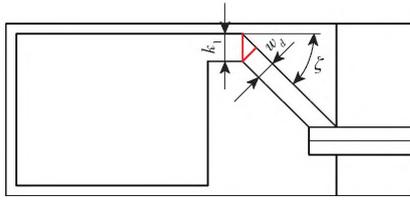


图 12 转向槽结构图

Fig. 12 Structural diagram of steering groove

由式(18)计算 ζ 范围为 $41.4^\circ \sim 55.8^\circ$, 圆整后为 $40^\circ \sim 56^\circ$ 。

3.2.2 种子输送阶段动力学分析

振动方向角影响振动板上种子的输送方式, 振动输送方式包括相对静止、正向滑动、反向滑动和抛掷运动。为提高输送效率, 本文按正向滑动设计振动板的振动方向角。种子在输送阶段受力如图 13 所示。

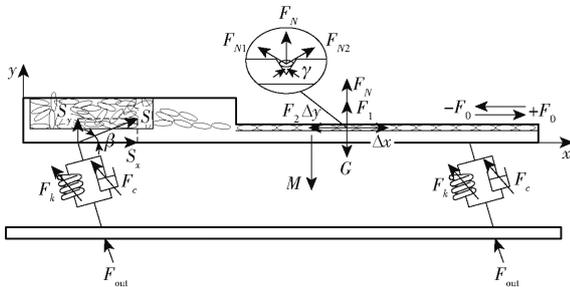


图 13 水稻种子在输送阶段受力分析

Fig. 13 Stress analysis of rice seeds during transportation

种子在 x 轴方向上的力为

$$\begin{cases} F_1 - F_2 \mp F_0 = m(a_x + \Delta \ddot{x}) \\ F_0 = \mp \mu_0 F_N \\ F_N = F_{N1} \sin \frac{\gamma}{2} + F_{N2} \sin \frac{\gamma}{2} \end{cases} \quad (19)$$

式中 $\Delta \ddot{x}$ ——种子与振动板 x 轴相对加速度, m/s^2

a_x ——振动板 x 轴方向加速度, m/s^2

F_{N1} 、 F_{N2} ——V 形槽两侧对种子的支撑力, N

F_N ——振动板对水稻种子支持力, N

F_0 ——工作表面对种子向后的摩擦力, N

F_1 ——前方种子作用力, N

F_2 ——后方种子作用力, N

μ_0 ——种子与工作表面滑动摩擦因数

种子在 y 轴方向上的力为

$$F_N - G = m(a_y + \Delta \ddot{y}) \quad (20)$$

式中 $\Delta \ddot{y}$ ——种子与振动板 y 轴相对加速度, m/s^2

a_y ——振动板 y 轴方向加速度, m/s^2

G ——种子重力, N

为避免抛掷运动, 种子需与 V 形槽保持接触, 即正压力 F_N 大于 0, 相对加速 $\Delta \ddot{y} = 0$ 。根据极限法可知, 当种子开始滑动时, $\Delta \ddot{x}$ 为 0, 综合式(19)、(20)

可得

$$m A \omega^2 \cos \beta \sin(\omega t + \varphi) \mp \tan \mu_0 (mg - m A \omega^2 \sin \beta \sin(\omega t + \varphi)) = 0 \quad (21)$$

式中 β ——振动方向角, ($^\circ$)

φ ——振动相位角, ($^\circ$)

引入正向滑动指数 D_k 和负向滑动指数 D_q , K 为振动强度, 计算式为

$$\begin{cases} D_k = K \frac{\cos(\mu_0 - \beta)}{\sin \mu_0} \\ D_q = K \frac{\cos(\mu_0 + \beta)}{\sin \mu_0} \\ K = \frac{\omega^2 A}{g} \end{cases} \quad (22)$$

式中 g ——重力加速度, 取 9.8 m/s^2

当 $D_k < 1$ 时, 不发生正向滑动, 当 $D_k > 1$ 时, 种子正向滑动, 为得到正向滑动时振动方向角, 由式(22)可得振动方向角 β 为

$$\beta = \arctan \frac{1 - e}{(1 + e) \tan \mu_0} \quad (23)$$

其中

$$e = \frac{D_q}{D_k} = \frac{\cos(\mu_0 + \beta)}{\cos(\mu_0 - \beta)}$$

当种子滑行运动时, 为确保种子有较好的滑行运动和较大的滑动速度, D_k 取 $2 \sim 3$, D_q 取 $1^{[23]}$, 由式(23)可得振动方向角 β 为 $23.96^\circ \sim 33.69^\circ$, 圆整后为 $23^\circ \leq \beta \leq 34^\circ$ 。

4 振动板仿真试验

4.1 模态仿真分析

为确定压电振动式匀种装置共振频率, 对其进行模态分析, 为输入频率的确定提供参考依据^[24]。

压电振动式匀种装置中振动板和连接座的材料为 PLA, 3 层压电振子中压电陶瓷材料为 PZT-52、中间层材料为 65Mn, 弹簧片材料为 60Si2Mn, 螺母和螺栓材料为不锈钢。上述所有材料密度、弹性模量和泊松比如表 1 所示。

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

材料	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E / MPa	泊松比
PZT-52	7.60×10^3	5.90×10^5	0.32
PLA	1.28×10^3	4.00×10^3	0.35
65Mn	7.85×10^3	1.96×10^5	0.28
60Si ₂ Mn	7.85×10^3	2.08×10^5	0.30
不锈钢	7.75×10^3	2.07×10^5	0.30

其前 4 阶共振频率分别为 125.76、290.12、348.46、515.56 Hz。前 4 阶振型如图 14 所示, 其中 1 阶振型振动板为刚体模态, 满足振动输送的要求,

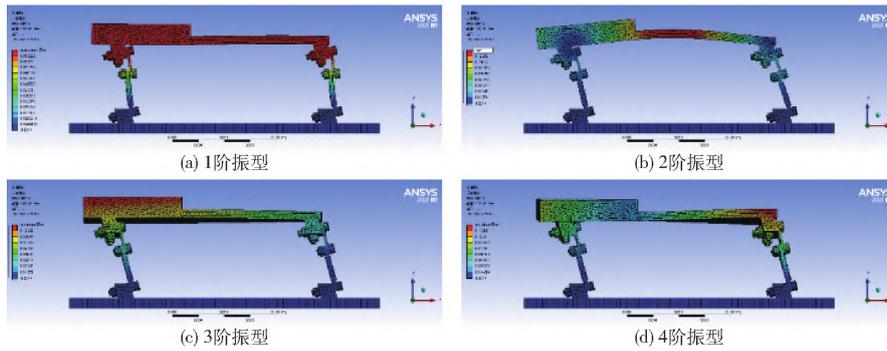


图14 振型云图

Fig. 14 Vibration mode nephograms

因此确定仿真振动频率为 125.76 Hz。

4.2 EDEM 仿真分析

4.2.1 仿真模型建立

建立超级杂交水稻深两优 5814 种子模型,其泊松比 0.25,剪切模量 108 MPa^[15],选用 Hertz - Mindlin 无滑移接触模型。振动板为 PLA 材料,依据文献[25 - 26]试验方法,测得种子与种子以及种子与 PLA 材料间的恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为 0.452、0.482、0.048 和 0.44、0.34、0.01。仿真模型如图 15 所示。

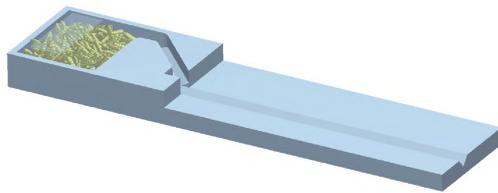


图 15 振动板仿真几何体模型

Fig. 15 Simulation model of vibrating plate

4.2.2 试验设计与评价指标

基于上述研究,在振幅 0.12 mm、振动频率 125.76 Hz 时进行三因素三水平响应面分析,试验因素如表 2 所示。

表 2 试验因素

Tab. 2 Test factors

编码	因素		
	振动方向角 $x_1/(^\circ)$	转向槽角度 $x_2/(^\circ)$	储种盒深度 x_3/mm
-1	23	40	8
0	28.5	48	10
1	34	56	12

经仿真预试验发现,在 5 s 后,供种效果趋于稳定,结合文献[20],统计 5 ~ 10 s 内 V 形槽排出每粒稻种的时间间隔,利用变异系数表示匀种均匀性。

4.2.3 试验方案和结果

应用 Design-Expert 12.03 软件进行 Box - Behnken 试验设计,试验结果见表 3。

表 3 试验方案和结果

Tab. 3 Experiment scheme and results

序号	因素			变异系数 $\gamma_2/\%$
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	0	61.5
2	1	-1	0	77.8
3	-1	1	0	53.3
4	1	1	0	42.1
5	-1	0	-1	30.1
6	1	0	-1	33.1
7	-1	0	1	32.5
8	1	0	-1	35.7
9	0	-1	-1	37.6
10	0	1	-1	30.3
11	0	-1	1	59.5
12	0	1	1	33.2
13	0	0	0	34.5
14	0	0	0	31.2
15	0	0	0	29.6
16	0	0	0	28.7
17	0	0	0	24.1

方差分析如表 4 所示,模型 P 小于 0.01,表明模型显著,失拟项 P 大于 0.05,表明失拟项不显著。转向槽角度、储种盒深度、振动方向角和转向槽角度交互作用对试验结果影响显著。影响由大到小依次

表 4 变异系数方差分析

Tab. 4 Coefficient of variation analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	3 293.80	9	21.34	0.000 3 **
X_2	750.78	1	43.78	0.000 3 **
X_3	111.01	1	6.47	0.038 4 *
$X_1 X_2$	189.06	1	11.02	0.012 8 *
X_1^2	498.19	1	29.05	0.001 **
X_2^2	1 391.25	1	81.13	<0.000 1 **
X_3^2	246.25	1	14.36	0.006 8 **
残差	120.05	7		
失拟	62.42	3	1.44	0.355 1
误差	57.63	4		
总方差	3 413.85	16		

注: ** 表示极显著 ($P < 0.01$); * 表示显著 ($0.01 < P < 0.05$)。

为转向槽角度、振动方向角和转向槽角度交互作用、储种盒深度。略去不显著项,得到变异系数的回归模型为

$$y_2 = 29.62 - 9.69X_2 + 3.73X_3 - 6.88X_1X_2 + 10.88X_1^2 + 18.18X_2^2 - 7.65X_3^2 \quad (24)$$

如图 16 所示,均匀性变异系数随着转向槽角度的增大呈先减小后增大的趋势,其原因在于,当转向槽处于低水平时,种子进入输种 V 形槽中的种子较多,各种子之间呈现堆叠状态,匀种虽连续,但不均匀。当转向槽处于高水平时,种子进入 V 形槽中的种子数量减少,有断流现象产生,因此匀种不均匀,变异系数较高。相比转向槽角度对均匀性变异系数的影响,振动方向角的变化较小,但同样呈现转向槽角度一定时,均匀性变异系数随着振动方向角的增大先减小后增大。因此为得到较低的均匀性变异系数,振动方向角和转向槽角度不宜过大。

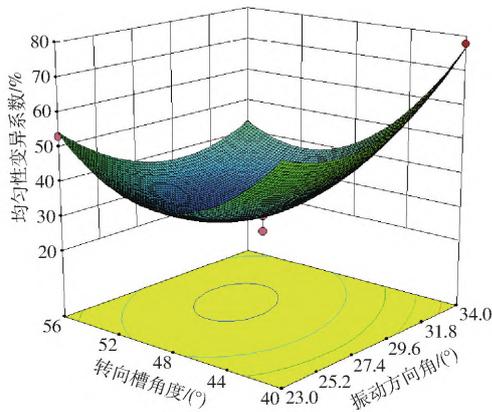


图 16 振动方向角和转向槽角度交互作用
Fig. 16 Interaction between excitation direction angle and steering groove angle

为优化各参数,以均匀性变异系数最低为目标,建立优化求解数学模型

$$\begin{cases} \min y_2 \\ \text{s. t. } \begin{cases} 23^\circ \leq x_1 \leq 34^\circ \\ 40^\circ \leq x_2 \leq 56^\circ \\ 8 \text{ mm} \leq x_3 \leq 12 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (25)$$

将优化结果圆整,得振动方向角为 29°、转向槽角度为 49°、储种盒深度为 8 mm 时,预测均匀性变异系数为 17.91%。

5 振动匀种试验

5.1 匀种电压与振幅关系拟合试验

通过改变输入电压调节振动装置振幅,为试验过程中便于调整振幅,需确定输入电压与振幅关系。由式(15)可知,在振动方向角和振动频率确定的情况下,振动板加速度与振幅比值为 ω^2 。因此通过测定输入电压与加速度的关系可间接导出输入电压与振

幅的关系。进行加速度测定台架试验,如图 17 所示。

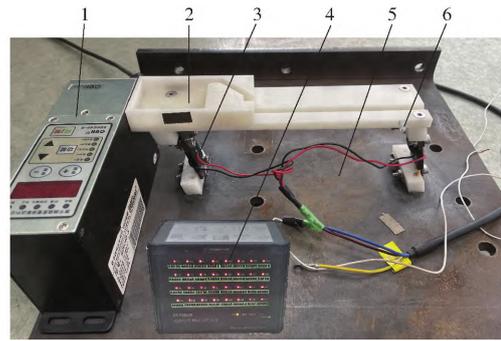


图 17 加速度测定台架试验

Fig. 17 Acceleration measurement bench test

- 1. 电源驱动器 2. 振动板 3. 压电振子 4. 动态信号采集仪
- 5. 底座 6. 传感器

采用 HP-DS8425 型动态信号采集仪记录振动信号,加速度传感器灵敏度为 101.2 mV/g。预试验表明,当匀种电压小于 130 V 时,种子运动缓慢,当电压高于 200 V 时,种子出现跳动现象,因此控制输入电压为 130 ~ 200 V。图 18 为 8 个不同电压输入下的加速度时域信号图,由图 18 可知,加速度幅值随电压增大而增加。

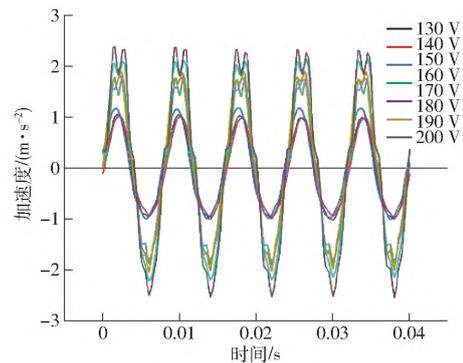


图 18 加速度变化曲线

Fig. 18 Acceleration change curves

对不同电压下的输出信号进行采集,每次采集时间为 20 s,重复试验 3 次,得到加速度幅值与电压关系如图 19 所示。

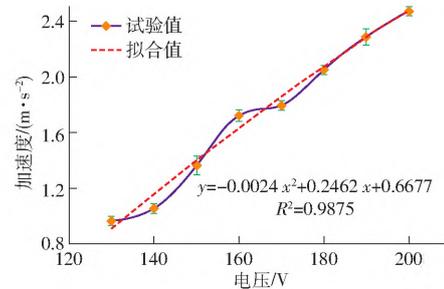


图 19 电压与加速度幅值关系曲线

Fig. 19 Relationship curves between voltage and acceleration amplitude

由式(15)可得到振幅与电压的关系如图 20 所示。

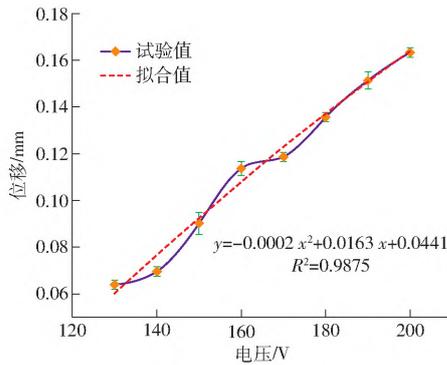


图20 振幅与电压关系曲线

Fig. 20 Relationship curves between amplitude and voltage

5.2 性能验证试验

为验证压电振动匀种装置结构参数的准确性,搭建试验台如图21所示,在振动方向角 29° 、转向槽角度 49° 、储种盒深度8 mm、振幅为0.12 mm、振动频率为125.76 Hz、输送带速度为0.064 m/s时进行优化参数下的播种性能试验,以匀种均匀性变异系数、播种合格率和漏播率为试验指标,规定1~2粒/穴为合格,统计播种200穴时播种合格率,得到均匀性变异系数、播种合格率和漏播率分别为18.20%、94.65%和0.67%,均匀性变异系数与上述仿真结果接近,播种合格率和漏播率满足超级杂交稻低播量精密播种育秧的技术要求。

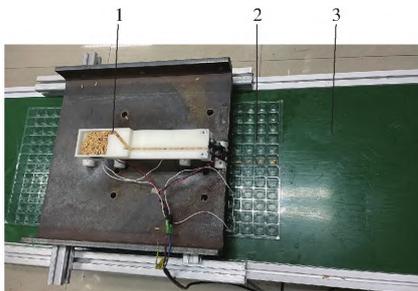


图21 振动匀种装置试验台

Fig. 21 Vibration homogenizer test bench

1. 振动板 2. 育秧盘 3. 输送带

5.3 不同匀种速度适应性试验

为验证压电振动匀种装置工作适应性,进行不同匀种速度的播种性能试验,以播种合格率和漏播率为试验指标,每组试验重复3次,结果如表5所示。

从表5可知,随着匀种电压的增大,匀种速度增大,播种合格率减小,漏播率增加,当工作电压为130~180 V时,其播种合格率不小于94.17%,漏播率不大于0.83%,播种性能优于目前振动排种器^[15],满足超级杂交水稻精量化育秧播种要求。

5.4 不同品种水稻种子适应性试验

为验证上述设计的压电振动匀种装置对不同品种杂交稻的适应性,选取华中优1号、川优6203、宜优2108 3种杂交水稻。选取130、150、170 V表示不

表5 试验结果

Tab. 5 Test result

电压/V	速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	播种合格率/%	漏播率/%
130	0.045	96.67	0.50
140	0.051	96.00	0.50
150	0.056	95.67	0.67
160	0.064	95.17	0.67
170	0.068	94.67	0.83
180	0.075	94.17	0.83
190	0.079	93.50	1.00
200	0.087	92.83	1.16

同的工作速度,以播种合格率和漏播率为试验指标,试验结果如表6所示。

表6 播种适应性试验结果

Tab. 6 Result of seeding performance test

品种	工作电压/V	播种合格率/%	漏播率/%
华中优1号	130	97.67	0.33
	150	96.00	0.67
	170	94.17	0.83
川优6203	130	95.83	0.33
	150	94.83	0.50
	170	94.17	0.83
宜优2108	130	96.83	0.50
	150	95.00	0.67
	170	94.17	1.00

试验结果表明,与深两优5814的试验结果一致,3种水稻种子的播种合格率均不小于94.17%,漏播率不大于1.0%。

6 结论

(1)针对振动式水稻育秧盘低播量精量排种器存在匀种均匀性差、难以提供单列稳定种子流影响播种精度的问题,提出一种压电振动式匀种装置,采用压电振子激励的方式,对压电振子结构参数、振动板结构参数进行设计计算,并分析了水稻种子在转向槽中的转向机理。

(2)对振动板储种盒深度、转向槽角度以及振动方向角进行仿真试验,确定储种盒深度为8 mm、转向槽角度为 49° 、振动方向角为 29° 时,种子均匀性变异系数为17.91%。

(3)加速度台架试验得到输入电压与振幅的关系,最优结构参数下振动板匀种均匀性变异系数、播种合格率和漏播率分别为18.20%、94.65%和0.67%,均匀性变异系数与上述仿真结果接近。

(4)不同匀种速度下的播种性能试验表明,当工作电压为130~180 V时,其播种合格率不小于94.17%,漏播率不大于1.0%,播种性能优于目前振动排种器,满足超级杂交水稻精量化育秧播种要求。

参 考 文 献

- [1] 王亚梁,朱德峰,向镜,等. 杂交稻低播量精量播种育秧及机插取秧特性[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(4): 332-338.
WANG Yaliang, ZHU Defeng, XIANG Jing, et al. Characteristics of seedling raising and mechanized transplanting of hybrid rice with a low seeding rate by precise seeding method[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2020, 34(4): 332-338. (in Chinese)
- [2] 刘静妍,闫双勇,张融雪,等. 水稻耐高温分子机制研究进展[J]. 天津农业科学, 2020, 26(1): 19-22.
LIU Jingyan, YAN Shuangyong, ZHANG Rongxue, et al. Recent advances in molecular mechanisms of thermotolerance in rice [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2020, 26(1): 19-22. (in Chinese)
- [3] 汪浩,张强,张文地,等. 腋芽萌发能力对再生稻产量影响的研究进展[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(3): 205-216.
WANG Hao, ZHANG Qiang, ZHANG Wendi, et al. Advances in the effects of the ability of axillary bud germination on grain yield in ratoon rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2020, 34(3): 205-216. (in Chinese)
- [4] 刘彩玲,王亚丽,都鑫,等. 摩擦复充种型孔带式水稻精量排种器充种性能分析与验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 29-36.
LIU Cailing, WANG Yali, DU Xin, et al. Filling performance analysis and verification of cell-belt rice precision seed-metering based on friction and repeated filling principle[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 29-36. (in Chinese)
- [5] 罗锡文,王在满,曾山,等. 水稻机械化直播技术研究进展[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 1-13.
LUO Xiwen, WANG Zaiman, ZENG Shan, et al. Recent advances in mechanized direct seeding technology for rice[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 1-13. (in Chinese)
- [6] 张妮,张国忠. 水稻种植机械化技术研究现状与展望[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(17): 5-10.
ZHANG Ni, ZHANG Guozhong. Research status and prospect of rice planting mechanization[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(17): 5-10. (in Chinese)
- [7] 张顺,夏俊芳,周勇,等. 气力滚筒式水稻直播精量排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 11-19.
ZHANG Shun, XIA Junfang, ZHOU Yong, et al. Design and experiment of pneumatic cylinder-type precision direct seed-metering device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 11-19. (in Chinese)
- [8] 张学义,邵耀坚,邹黎,等. 电磁振动排种器种子运动分析及试验研究[J]. 农业工程学报, 1996, 12(1): 81-86.
ZHANG Xueyi, SHAO Yaojian, ZOU Li, et al. Theoretical analysis and experiment on the kinematics of feeding device under electromagnetic vibration[J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(1): 81-86. (in Chinese)
- [9] 苏江,杨志刚,田丰君,等. 惯性式压电振动送料器[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 281-286.
SU Jiang, YANG Zhigang, TIAN Fengjun, et al. Inertial piezoelectric vibratory feeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 281-286. (in Chinese)
- [10] 周海波,梁秋艳,魏天路,等. 双级振动精密排种器外槽轮式定量匀种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 57-61.
ZHOU Haibo, LIANG Qiuyan, WEI Tianlu, et al. Design and experiment of quantitative seed supply device with fluted roller used for double-vibrating precision seed meter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 57-61. (in Chinese)
- [11] 马旭,邝健霞,齐龙,等. 水稻田间育秧精密播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 31-37.
MA Xu, KUANG Jianxia, QI Long, et al. Design and experiment of precision seeder for rice paddy field seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 31-37. (in Chinese)
- [12] 鹿芳媛,马旭,齐龙,等. 振动式水稻精密播种装置机理分析与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 119-128.
LU Fangyuan, MA Xu, QI Long, et al. Theory and experiment on vibrating small-amount rice sowing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 119-128. (in Chinese)
- [13] 谭祖庭,马旭,齐龙,等. 振流式精密播种装置种层厚度检测及控制系统研制[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 10-16.
TAN Zuting, MA Xu, QI Long, et al. Detection and control system of seed-layers thickness for vibration-flow precision seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(21): 10-16. (in Chinese)
- [14] 李志伟,邵耀坚. 电磁振动式水稻穴盘精量播种机的设计与试验[J]. 农业机械学报, 2000, 31(5): 32-34.
LI Zhiwei, SHAO Yaojian. Study and test of electromagnetic vibrating type rice seeder for hill seedling nursery box [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(5): 32-34. (in Chinese)
- [15] 鹿芳媛,马旭,齐龙,等. 基于离散元法的杂交稻振动匀种装置参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 17-25.
LU Fangyuan, MA Xu, QI Long, et al. Theory and experiment on vibrating small-amount rice sowing device[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 17-25. (in Chinese)
- [16] 王朝辉,马旭. 超级稻精密播种器种层振动测试与分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 68-72.
WANG Zhaohui, MA Xu. Vibrating measurement and analysis of seeds layer on precision seedling planting parts for super hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 68-72. (in Chinese)
- [17] 刘卫星. 压电式振动给料器的机理分析与实验研究[D]. 长春:吉林大学, 2006.
- [18] LEE J K, MARCUS M A. The deflection-bandwidth product of poly(Vinylidene fluoride) benders and related structures[J]. Ferroelectrics, 1981, 32(1): 93-101.
- [19] 陈长春,周海波,马翔,等. 振动式精密排种器排种速度仿真与分析[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2014, 32(3): 408-411.
CHEN Changchun, ZHOU Haibo, MA Xiang, et al. Simulation and analysis of seeding speed for vibrating precision seed

- meter[J]. Journal of Jiamusi University(Natural Science Edition), 2014, 32(3): 408-411. (in Chinese)
- [20] 袁昊,刘彩玲,宋建农,等. 超级杂交稻穴盘育苗精量排种器压电振动匀种装置研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 31-40.
YUAN Hao, LIU Cailing, SONG Jiannong, et al. Piezoelectric vibration seed supply device of precision metering device for plug seedling of super hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 31-40. (in Chinese)
- [21] 郭浩. 矩形穿孔板压电换能器的弯曲振动研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2019.
- [22] 刘超. 压电悬臂梁水平布置式直线送料器的设计研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [23] 方同,薛璞. 振动理论及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004: 37-43.
- [24] 扈凯,张文毅,李坤,等. 基于模态规划法的履带拖拉机车架振动分析与优化[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(8): 121-126.
HU Kai, ZHANG Wenyi, LI Kun, et al. Vibration analysis and optimization of tracked tractor frame based on modal programming method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(8): 121-126. (in Chinese)
- [25] 于庆旭,刘燕,陈小兵,等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 123-132.
YU Qingxu, LIU Yan, CHEN Xiaobing, et al. Calibration and experiment of simulation parameters for panax notoginseng seeds based on DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 123-132. (in Chinese)
- [26] 石林榕,孙伟,赵武云,等. 马铃薯种薯机械排种离散元仿真模型参数确定及验证[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 35-42.
SHI Linrong, SUN Wei, ZHAO Wuyun, et al. Parameter determination and validation of discrete element model of seed potato mechanical seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 35-42. (in Chinese)

(上接第 47 页)

- [9] 刘卉,孟志军,王培,等. 基于农机空间轨迹的作业面积的缓冲区算法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 180-184.
LIU Hui, MENG Zhijun, WANG Pei, et al. Buffer algorithms for operation area measurement based on global navigation satellite system trajectories of agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 180-184. (in Chinese)
- [10] 尹彦鑫,王成,孟志军,等. 悬挂式深松机耕整地耕深检测方法研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 68-74.
YIN Yanxin, WANG Cheng, MENG Zhijun, et al. Operation quality measurement method for tilling depth of suspended subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 68-74. (in Chinese)
- [11] 王培,孟志军,尹彦鑫,等. 基于农机空间运行轨迹的作业状态自动识别试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 56-61.
WANG Pei, MENG Zhijun, YIN Yanxin, et al. Automatic recognition algorithm of field operation status based on spatial track of agricultural machinery and corresponding experiment[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 56-61. (in Chinese)
- [12] CAI Y, WU C, LUO M, et al. Automatic recognition method of operation status for agricultural machinery based on GNSS data mining[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) Proceedings, 2012: 135-145.
- [13] HUANG P, LUO X, ZHANG Z. Headland turning control method simulation of autonomous agricultural machine based on improved pure pursuit model[C]//IFIP International Federation for Information Processing, 2010: 176-184.
- [14] 王培,孟志军,安晓飞,等. 拖拉机功率与深松作业效率关系研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 87-90.
WANG Pei, MENG Zhijun, AN Xiaofei, et al. Relationship between agricultural machinery power and agricultural machinery subsoiling operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 87-90. (in Chinese)
- [15] ZHOU K, LECK J A, SØRENSEN C G, et al. Agricultural operations planning in fields with multiple obstacle areas[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 109: 12-22.
- [16] HAMEED I A, BOCHTIS D D, SØRENSEN C G, et al. Automated generation of guidance lines for operational field planning[J]. Biosystems Engineering, 2010, 107(4): 294-306.
- [17] PALMER R J, WILD D, RUNTZ K. Improving the efficiency of field operations[J]. Biosystems Engineering, 2003, 84(3): 283-288.
- [18] BOCHTIS D D, VOUGIOUKAS S G. Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(1): 1-12.
- [19] 陈凯,解印山,李彦明,等. 多约束情形下的农机全覆盖路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 17-26, 43.
CHEN Kai, XIE Yinshan, LI Yanming, et al. Full coverage path planning method of agricultural machinery under multiple constraints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 17-26, 43. (in Chinese)
- [20] 张帆,罗锡文,张智刚,等. 基于改进多父辈遗传算法的农机调度优化方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 192-198.
ZHANG Fan, LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, et al. Agricultural machinery scheduling optimization method based on improved multi-parents genetic algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 192-198. (in Chinese)
- [21] 赵春江,陈立平,黄文倩,等. 一种收割面积测量与计费系统及方法: CN101398297[P]. 2009-04-01.
- [22] JOHN T E, SANTOSH K P, JOE D L, et al. Row crop grain harvester path optimization in headland patterns[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 171: 1-8.
- [23] 张凯,白美健,李益农,等. 联合收割机生产率计算模型与适宜作业路线分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 37-43.
ZHANG Kai, BAI Meijian, LI Yinong, et al. Combine harvester productivity calculation model and analysis of suitable operation route[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 37-43. (in Chinese)