doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.004

超级杂交稻穴盘育苗精量排种器压电振动供种装置研究

袁　昊　刘彩玲　宋建农　都　鑫　姜　萌　李玮昊
（中国农业大学农业农村部土壤-机器-植物系统技术重点实验室，北京 100083）

摘要：为提高超级杂交稻穴盘育苗低播量排种器的播种性能，设计一种压电式振动供种装置，提出一种小供种量条件下均匀、有序、单列供种的导流振动板。阐述了压电式振动供种装置的工作原理，构建了振动装置动力学模型，分析了稻种在振动板上的运动机理，确定了其主要工作参数。以振幅、储种盒深度为试验因素进行仿真试验和回归及响应曲面分析，建立了振幅、储种盒深度与供种速率、供种速率变异系数和单列率间的数学模型，试验结果表明振幅对供种速率影响极其显著，储种盒深度对单列率影响极其显著；当 600 ~ 1 000 盘/h 生产率条件下确定最佳储种盒深度为 9 mm，振幅范围为 0.4 ~ 0.6 mm。振动供种性能和排种性能样机试验结果表明，当通电电压为 120 ~ 140 V 时，供种速率为 6.1 ~ 13.4 粒/s，供种速率变异系数为 10% ~ 14%，单列率为 77.5% ~ 84.6%，与回归模型误差分别小于 6%、9%、4%，且各列间供种速率变异系数小于 4%；样机试验结果表明，当生产率为 600 盘/h 时，天优 998 和蜀优 217 的 1 ~ 2 粒/穴合格率分别为 95.54% 和 94.88%，漏播率为 2.47% 和 2.96%，满足超级杂交稻低播量精密播种的设计要求，该研究为工厂化穴盘育秧精量播种机的设计提供参考。

关键词：超级杂交稻；压电振动；供种；设计；试验
中图分类号：S223.2^{+}3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2020)S2-0031-10

Piezoelectric Vibration Seed Supply Device of Precision Metering Device for Plug Seedling of Super Hybrid Rice

YUAN Hao　LIU Cailing　SONG Jiannong　DU Xin　JIANG Meng　LI Weihao
(*Key Laboratory of Soil - Machine - Plant System Technology*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to improve the seeding performance of the seed metering device with low seeding rate for plug seedling raising of super hybrid rice, a piezoelectric vibration seed supply device was designed, and a new type of guide vibrating plate with uniform, orderly and single row feeding under the condition of small seed supply was proposed. The working principle of the piezoelectric vibration seed supply device was described, the dynamic model of the vibration device was constructed, the motion mechanism of rice seed on the vibrating plate was analyzed, and its main working parameters were determined. Taking amplitude and depth of seed box as experimental factors, the simulation test, regression and response surface analysis were carried out. The mathematical models of amplitude, depth of seed box and feeding rate, coefficient of variation of seed supply rate and single column rate were established. The results showed that amplitude had a significant effect on seed supply rate, and seed box depth had an extremely significant effect on single row rate. Under the productivity of 600 ~ 1 000 plates/h, the mathematical models of amplitude, box depth and single row rate were established. The optimum depth of seed storage box was 9 mm, and the amplitude range was 0.4 ~ 0.6 mm. The results of vibration seed supply performance and seed metering performance prototype test showed that when the power supply voltage was 120 ~ 140 V, the seed supply rate was 6.1 ~ 13.4 seeds/s, the variation coefficient of seed supply rate was 10% ~ 14%, the single row rate was 77.5% ~ 84.6%, and the error between the regression model and the regression model was less than 6%, 9% and 4%, respectively, and the variation coefficient of seed supply rate between columns was less than 4%. The results of prototype test showed that the

收稿日期：2020 - 08 - 06　修回日期：2020 - 09 - 16
基金项目：国家重点研发计划项目(2016YFD020060704)
作者简介：袁昊(1995—)，男，博士生，主要从事农业机械与农业装备研究，E-mail：1468638322@qq.com
通信作者：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@cau.edu.cn

qualified rate of 1 ~ 2 seeds/hole of Tianyou 998 and Shuyou 217 was 95.54% and 94.88%, and the missing sowing rate was 2.47% and 2.96% when the productivity was 600 plates/h, which met the design requirements of low sowing rate and precision sowing of super hybrid rice. The research provided reference for the design of factory precision seeder for plug seedling raising.

Key words: super hybrid rice; piezoelectric vibration; seed supply; design; experiment

0 引言

超级杂交稻种植强调少本稀植促进分蘖,要求单苗栽插并适当降低密度,对提高水稻单产效果显著[1-3]。考虑种子发芽率、机插秧漏插率、伤秧率、秧块盘结力等影响,目前工厂化穴盘育秧超级杂交稻低播量精密播种农艺要求为 1 ~ 2 粒/穴[4-6]。目前在大豆、玉米等近圆形表面光滑种子基本实现了单粒精量排种[7-8],但对于水稻这种表面粗糙的非圆形种子,充种过程极为复杂,因此实现低播量精密播种仍是目前超级稻工厂化穴盘育秧研究的难点。

目前,欧美国家精密播种主要集中在玉米、大豆、蔬菜等作物[9-10];亚洲国家如日本、韩国水稻育秧播种技术先进,但主要适用于常规稻大播量播种,不能满足超级稻低播量要求。国内对超级杂交稻精密排种器研究主要集中在机械式、气力式和振动式,其中振动式水稻精量排种器具有结构简单,成本低等特点得到认可并开展了大量研究[11-14]。从现有研究看,振动式精量排种器的激振方式主要有机械式、气力式和电磁式 3 种[15-18]。机械式结构复杂,参数调节困难;气力式对气源稳定性要求较高,调节振动频率困难;电磁式体积大、能耗大,噪声大,安装调试复杂、电压与电磁铁吸附力呈非线性关系,且最大振幅由电磁铁与衔铁之间的距离决定,调节困难[19]。另外,还存在振动板输送种子量偏多进而增大每穴播种量,供种速率变异大等问题。

为满足超级稻单株栽插种植农艺,基于目前振动器存在的缺陷,本文提出一种压电振动式输送装置。同时根据水稻机械物理特性提出一种能实现稻种单列连续输送的导流振动板,为后续型孔轮排种器提供均匀连续单列稳定的供种种子流,最终满足 1 ~ 2 粒/穴的穴盘育秧精量播种要求。

1 压电振动式精量排种器结构与工作原理

压电振动式水稻精量排种器与 15 × 25 的水稻育秧穴盘配套使用,其结构主要由种箱、外槽轮、接种盒、压电振动供种装置、型孔轮、护种板等组成(图 1),其中压电振动供种装置包括底座、压电片、板弹簧、导流振动板,导流振动板上有 15 列包括储种盒、导种槽、清种槽、V 形槽的单列导流结构,如图 2a 所示,导流振动板为中线对称俯视图。

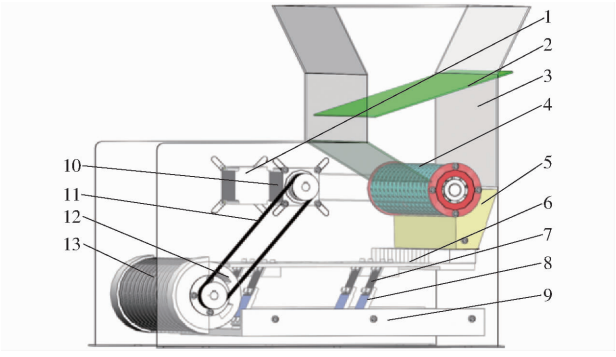
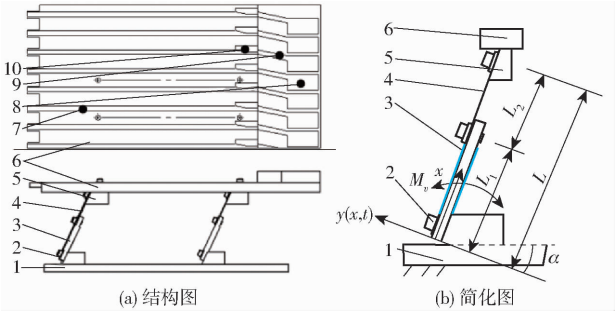


图 1 压电振动式精量排种器结构图

Fig. 1 Structure diagram of piezoelectric vibration precision metering device

1. 供种电机 2. 隔板 3. 种箱 4. 外槽轮 5. 接种盒 6. 导流振动板 7. 板弹簧 8. 压电片 9. 底座 10. 排种电机 11. 同步带 12. 型孔轮 13. 护种板



(a) 结构图 (b) 简化图

图 2 压电振动供种装置

Fig. 2 Piezoelectric vibration seed supply device

1. 底座 2. 螺栓 3. 压电片 4. 板弹簧 5. 安装座 6. 导流振动板 7. V 形槽 8. 储种盒 9. 导种槽 10. 清种槽

工作时,外槽轮排出的种子经接种盒进入储种盒,导流振动板在压电激振作用下往复振动,储种盒内种子经导种、清种后进入 V 形槽,稻种由多到少,由无序到有序,最终实现 15 列 V 形槽内的稻种沿长轴方向首尾相连、均匀连续地单列稳态定向输送,并与型孔轮配合完成充种和投种作业,实现超级杂交稻穴盘育秧 1 ~ 2 粒/穴低播量精密播种的农艺要求。

2 压电振动供种装置参数设计

2.1 压电振动参数设计

2.1.1 结构参数

压电振动是利用压电材料的逆压电效应完成电能到动能的转换,具有结构简单,噪声小、耗能低、易于实现精密进给控制和输送速度调整、输出线性等

优点。通过给压电陶瓷施加一定频率交流电压使压电陶瓷产生振动，从而激励整个结构振动，达到振动输送的目的。本文基于压电振动送料器设计了压电振动供种装置（图 2），导流振动板水平安装，4 个压电片与弹簧板组成的振动单体以 170 mm × 264 mm 的间距均布在振动板底面，弹簧板起振动放大作用，其余结构参数见表 1[20-21]。

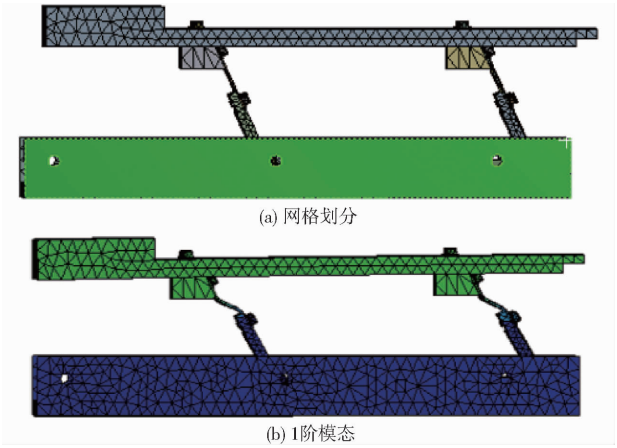
表 1　压电振动结构参数

Tab. 1　Structural parameters of vibration seed supply device

参数	数值
压电片弹性模量/Pa	2.07×10^{11}
压电片尺寸（长 × 宽 × 厚）/（mm × mm × mm）	86 × 50 × 4
压电应变常数/（m·V^{-1}）	-2.7×10^{-10}
压电片厚度/mm	1
弹簧板弹性模量/Pa	9.56×10^{10}
弹簧板尺寸（长 × 宽 × 厚）/（mm × mm × mm）	40 × 50 × 2
振动板质量/kg	2.5
安装座质量/kg	0.1
螺栓质量/kg	1.5×10^{-2}
底座厚度/mm	10

2.1.2　工作频率

压电振动送料器是利用共振频率附近的共振效应实现物料快速、平稳输送，工作在 1 阶振动模态下的共振点符合振动送料器振动规律和工作要求[22-23]。为确定压电振动供种装置工作频率，利用 ANSYS 软件对该结构进行有限元模态分析，根据结构参数（表 1）和 2.2 节中导流振动板参数，建立该振动装置模型并划分网格（图 3a），共计 770 404 个单元，1 169 845 个节点，固定底座侧面，并对该模型求解。结果表明，模型 1 阶模态（图 3b）表现为弹簧板对称弯曲，振动板不变形，为振动输送模态，此时对应的共振频率 ω_n 为 52.90 Hz。为减少共振损伤，确定压电振动在共振频率附近，工作频率 ω = $0.9\omega_n$[24] 为 47.61 Hz。



(a) 网格划分

(b) 1阶模态

图 3　有限元分析模型

Fig. 3　Finite element analysis model

2.1.3　振幅分析

建立振动供种装置动力学模型如图 2b 所示[25]，其中 L_1、L_2、L 分别为压电片长度、弹簧板长度和总长度，α 为压电片安装角（也为供种装置的振动方向），M_v 为工作时绕底部固定点产生的弯矩。

将振动供种装置视为静定悬臂梁结构，用假定模型法构建输送装置的动力学模型，得到振动供种装置运动微分方程[23]为

$$\boldsymbol{M}_{ij}\ddot{\boldsymbol{q}}(t)+\boldsymbol{C}_{ij}\dot{\boldsymbol{q}}(t)+\boldsymbol{K}_{ij}\boldsymbol{q}(t)=F_i\tilde{V}(t)\quad(i,j=1,2,\cdots,n)\tag{1}$$

式中　i、j——模态阶数

F_i——与整体结构相关的常数

$\boldsymbol{M}_{ij}$——质量矩阵　　$\boldsymbol{K}_{ij}$——刚度矩阵

$\boldsymbol{C}_{ij}$——阻尼矩阵　　$\boldsymbol{q}(t)$——位移向量

$\tilde{V}(t)$——交流电压，V

振动供种装置工作在 1 阶振动模态，因此令 $i=j=1$，由式（1）非齐次微分方程得 $q(t)$ 稳态运动及加速度 $a(t)$ 表达式为

$$\begin{cases}q(t)=A\sin(\omega t-\phi)\\ a(t)=\ddot{q}(t)=-A\omega^2\sin(\omega t-\phi)\end{cases}\tag{2}$$

其中

$$A=\frac{F_1\tilde{V}(t)}{\sqrt{(\omega_n^2-\omega^2)^2+\left(\frac{C_{11}}{M_{11}}\omega\right)^2}}$$

式中　A——最大振幅，mm

ϕ——相位角，(°)

由式（2）可知，在结构参数和工作频率 ω 一定条件下，振动装置振幅与通电电压呈线性关系，因此其具有良好的振动特性，可通过调节电压实现振幅的调整。将工作频率 ω 47.61 Hz、压电片安装角 α 15°代入式（2），确定满足稻种稳定输送的振幅范围为 0 ~ 1 mm。

2.2　导流振动板参数设计

2.2.1　导流振动板参数分析和单列供种原理

为实现稻种由多到少、由无序到有序的姿态转变，以天优 998 超级稻种子（平均三轴尺寸 9.44 mm × 2.40 mm × 1.96 mm）为研究对象，提出一种导流振动板。为与 15 × 25 的水稻育秧穴盘配套使用，设计导流振动板长、宽分别为 355、300 mm，水平固定在安装座上，其上共有 15 列图 4 所示的单列导流结构，单列导流结构包括储种盒、导种槽、清种槽和横向均布间距为 24 mm 的 V 形槽，其结构和参数如图 4 所示，储种盒长、宽为 30、20 mm，深度为 H。为增加储种盒出口稻种的流动能力避免横向堵塞，采用非对称设计，出口位置与储种盒内侧边缘对齐，宽

度为 7 mm(图 4a)。导种槽 V 形截面与 V 形槽截面尺寸一致(图 4b、4c、4d、4e),为便于稻种由导种槽进入 V 形槽时姿态转变,设计 V 形槽单边竖直。

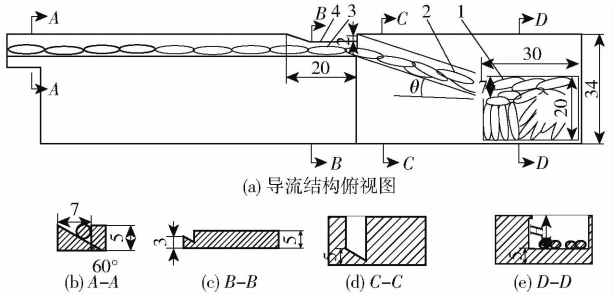


图 4 振动板单列导流结构示意图

Fig. 4 Schematic of single row guide of vibrating plate

1. 储种盒 2. 导种槽 3. V 形槽 4. 清种槽

稻种经外槽轮排种器进入储种盒,缓种后沿长轴方向进入导种槽,由导种槽进入 V 形槽过程中,多余稻种由清种槽排出,稻种调整姿态,其长轴方向平行于 V 形槽方向,以此实现单列连续输送。特别是储种盒的设计,可缓冲外槽轮排种脉动对种子输送均匀性的影响。导流振动板可通过压电振动输送为型孔轮提供单列、均匀、有序的小量稻种流,以提高穴盘育秧播种精度。在一定条件下,供种量和供种均匀性只取决于自身振动参数,提高了小供种量条件下振动供种均匀性。

2.2.2 储种盒深度设计

储种盒是确保稻种输送质量的重要结构。工作时,储种盒内种层厚度随槽轮供种波动在储种盒深度范围内变化,随种层厚度增加,底层稻种因压力和摩擦力增大导致流动性下降,出现稻种流动不稳、断流、堵塞出口等问题,为保证稻种流动稳定,储种盒内种层厚度存在极限值。为防止外槽轮排种波动影响种群极限厚度,降低稻种流动性能,设计储种盒深度 H 与种层极限厚度一致,储种盒深度 H 是关键参数。

为确保底层稻种带动上层稻种实现连续稳定流动,以出口侧的底层稻种和其上方稻种为研究对象,分别简化为质量块 m_d、m_b(图 5)。质量块 m_d 的长度 L、宽度 W、高度 H_d 分别与储种盒长度、出口宽度、稻种厚度相等(30、7、2 mm),质量块 m_b 的长度 L、宽度 W、高度 H_b 分别为 30、7 mm 和($H-2$) mm。

振动供种装置工作时,质量块 m_d 受力如图 5 所示,分布为惯性力 $m_d a(t)$、总摩擦力 f_a、底部支持力 F_D、质量块 m_b 压力 F_u、侧壁支持力 F_L、出口右侧稻种侧压力 F_R。由于储种盒体积小、高度低,忽略种群产生的侧压力,既 $F_L = F_R = 0$。质量块 m_d 正常流动,在水平方向应满足向前惯性力大于总摩擦力,表达式为

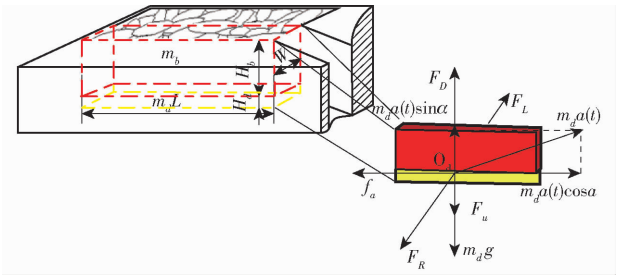


图 5 底层稻种受力示意图

Fig. 5 Stress diagram of bottom rice seed

$$\begin{cases} m_d a(t)\cos\alpha - f_a > 0 \\ 0 = F_D + m_d a(t)\sin\alpha - m_d g - F_u \\ m_d = 2LWC_r\rho_r \\ F_u = LW(H-2)C_r\rho_r(g - a(t)\sin\alpha) \\ f_a = F_D\mu_v + F_u\mu_r \end{cases} \tag{3}$$

式中 C_r——稻种容重,取 0.575 g/mm^3

ρ_r——稻种密度,取 1.098 g/mm^3

μ_r——稻种间滚动摩擦因数,取 0.015

μ_v——稻种与储种盒滑动摩擦因数,取 0.01

联立式(2)、(3)得到

$$H < \frac{174\,857A}{9\,810 - 587A} + 1.92$$

压电片安装角 α 为 15°,振幅 A 在 0 ~ 1 mm,储种盒深度 H 为 1.92 ~ 20.87 mm。

储种盒深度影响稻种流动规律,振幅影响储种盒深度极限值,二者存在相关性,因此确定合适的振幅和储种盒深度是确保稻种输送质量的关键。

2.2.3 导种槽角度设计

导种槽角度 θ 影响导种槽进入 V 形槽的稻种数量,为使稻种在 V 形槽内单列输送,分析导种槽内种子数量对顺利进入 V 形槽的影响。

假设导种槽内只有单列稻种(图 6a),稻种沿长轴平行于导种槽方向移动,为保证稻种顺利进入 V 形槽不发生堵塞,根据 $\triangle R_1AB$ 几何关系,需满足

$$\begin{cases} l_3 > \dfrac{l_r}{2} \\ l_3 = \dfrac{l_2}{\sin\theta} \\ l_2 = l_1 - \dfrac{w_r}{2} \end{cases} \tag{4}$$

式中 l_r——稻种长度,mm

w_r——稻种宽度,mm

l_1——稻种中轴线高度对应的 V 形槽宽度,mm

l_2——稻种与 V 形槽内壁接触点与稻种重心的水平距离,mm

l_3——稻种在 V 形槽内壁接触点与稻种重心的竖直距离，mm

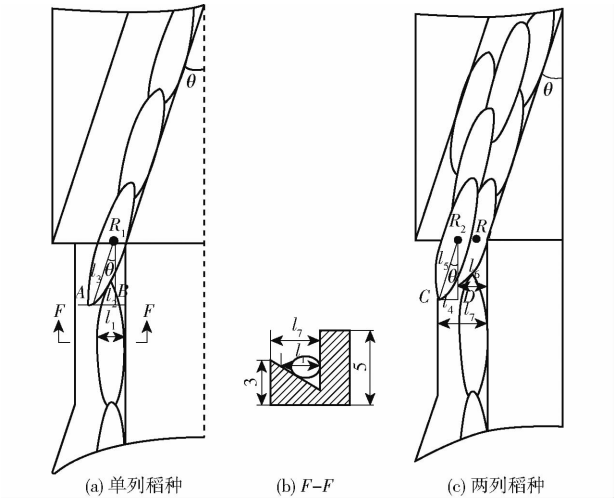


图 6　导种槽结构示意图

Fig. 6　Structure diagrams of seed guide groove

假设导种槽内有两列或两列以上稻种（图 6c），为保证导种槽内侧稻种顺利进入 V 形槽，外侧稻种需沿清种槽排出，确保 V 形槽内稻种单列排序，根据 $\triangle R_2CD$ 中几何关系，需要满足

$$\begin{cases} l_4 > l_7 - l_6 \\ l_4 = l_5 \sin\theta \\ l_5 = \dfrac{l_r}{2} \\ l_6 = w_r \end{cases} \tag{5}$$

式中　l_4——稻种边缘与稻种重心 R_2 的水平距离，mm

l_5——稻种边缘与稻种重心 R_2 的距离，mm

l_6——V 形槽内侧壁与稻种重心 R_2 水平距离，mm

l_7——清种槽处 V 形槽宽度，mm

将图 6 中相关尺寸代入式（4）、（5）确定 θ 为 20°。

2.3　稻种运动分析

为确保稻种在振动板上稳定向前滑动，避免出现抛掷，以单粒稻种为研究对象，探究稻种向前运动机理。图 7a、7b 为稻种在振动板上单个周期内运动示意图和电压与激振力示意图，1、2、3、5、6 分别表示振动供种装置单个运动周期内静止位置、左加速终止位置、左终止位置、右加速终止位置和右终止位置，O_1、O_2、O_3、O_4、O_5、O_6 分别为振动板不同位置时对应的稻种位置。t_1、t_2、t_3、t_4、t_5、t_6 分别为振动板工作时的运动状态变化的时刻，Δt 表示 t_1、t_2 的时间差，T 为运动周期，F_1、F_2 为激振力。振动供种装置单周期运动过程可分为左上运动、复位、右下运动、复位 4 个状态。

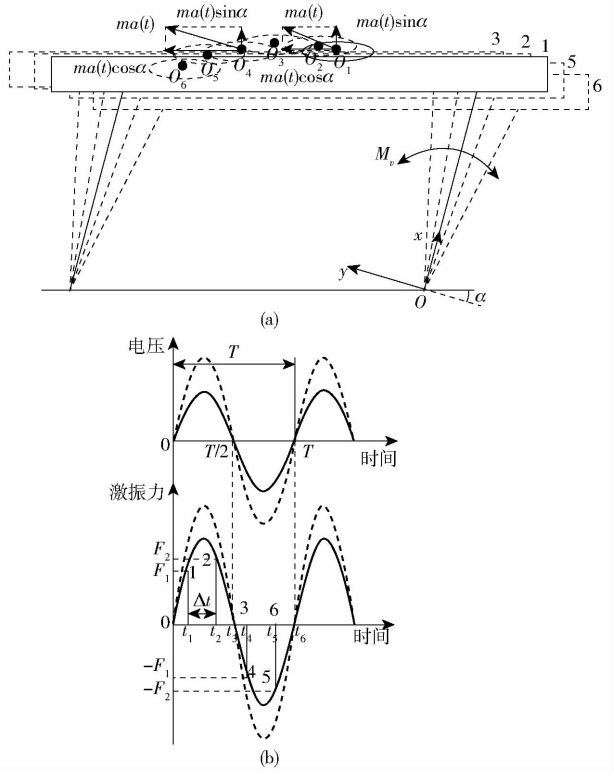


图 7　稻种运动示意图

Fig. 7　Schematics of rice seed movement

左上运动过程为时段 $t_1 \sim t_3$，其中时段 $t_1 \sim t_2$，激振力 F_1 克服振动供种装置刚性，振动供种装置以加速度 $a(t)$ 向左上加速运动，到达位置 2，该过程装置弹性势能增加。时段 $t_2 \sim t_3$，激振力 F_2 不足以继续驱动装置加速运动，装置由位置 2 向位置 3 做减速运动。左上运动过程中，稻种在时段 $t_1 \sim t_2$ 随装置加速运动到达 O_2，在时段 $t_2 \sim t_3$ 以原速度减速运动，最终达到 O_3。

复位运动过程为时段 $t_3 \sim t_4$，该过程激振力反向，装置依靠自身弹性势能回弹至静止位置，稻种继续减速，达到 O_4。

右下运动过程为时段 $t_4 \sim t_6$，其中时段 $t_4 \sim t_5$，激振力 $-F_1$ 克服振动供种装置刚性，振动供种装置以加速度 $a(t)$ 向右下加速运动，到达位置 5，该过程装置弹性势能增加时段 $t_5 \sim t_6$，激振力 $-F_2$ 不足以继续驱动装置加速运动，装置由位置 5 向位置 6 做减速运动。右下过程中，稻种在时段 $t_4 \sim t_5$ 受到向左的惯性力 $ma(t)$ 向左加速运动，由于竖直方向加速度小于重力加速度 g，该过程稻种继续下落，最终到达 O_5。在时段 $t_5 \sim t_6$，稻种以原速度做减速运动并到达 O_6。装置在下一周期复位，并循环上述运动过程。

以 O_2 点速度为例，分析稻种稳定向前输送条件。结合式（2），稻种在 O_2 处的竖直速度 v_{t2}、水平速度 v_{h2} 表达式为

$$\begin{cases} v_{v2} = A\omega^2 \sin(\omega t)\sin\alpha\Delta t \\ v_{h2} = A\omega^2 \sin(\omega t)\cos\alpha\Delta t \end{cases} \tag{6}$$

为保证稻种向前输送,其水平速度 v_{h2} 需满足

$$\begin{cases} v_{h2} > 0 \\ v_{h2} > v_{v2} \end{cases}$$

将式(6)代入得压电片安装角 α 范围为(0°,45°)。图 7a 中虚线所示的单个周期内稻种抛物线运动轨迹,O_3 为最高点位置。稻种和振动板从位置 1 到位置 3 的竖直位移 x_{vr}、x_{vb} 分别为

$$\begin{cases} x_{vr} = v_{v2}\left(\dfrac{T}{2} - t_2\right) - \dfrac{g}{2}\left(\dfrac{T}{2} - t_2\right)^2 \\ x_{vb} = A\sin\alpha \end{cases} \tag{7}$$

为保证稻种稳定不出现抛掷状态,需满足

$$x_{vr} < x_{vb}$$

将式(6)、(7)代入条件中得到

$$A\omega^2 \sin(\omega t)\sin\alpha\Delta t\left(\frac{T}{2} - t_2\right) - \frac{g}{2}\left(\frac{T}{2} - t_2\right)^2 < A\sin\alpha \tag{8}$$

式(8)表明,振幅 A、工作频率 ω、压电片安装角 α 三因素共同影响稻种运动状态,为确保稻种稳定向前滑动不出现抛掷运动,应满足式(8)的关系。其中压电片安装角 α 影响稻种运动,若 α 较大,稻种垂直振动板方向速度增大,易出现抛掷;若 α 较小,稻种水平速度过大,不利于稻种连续稳定输送,参考现有压电振动送料器,确定安装角 α 为 15°[20]。

3 压电振动供种装置仿真分析

基于上述分析,振幅 A 和储种盒深度 H 是影响稻种运动规律的待定参数,因此为探讨二者对供种性能的影响进行 EDEM 离散元仿真分析。

3.1 供种装置仿真模型建立

建立振动供种装置 Hertz - Mindlin 无滑动接触仿真模型,以多球元建立稻种椭球模型,依据前述稻种尺寸,长轴 9.44 mm,短轴宽度和厚度均为 2.18 mm,确定仿真参数为[14]:泊松比 0.25、剪切模量为 108 MPa,密度为 1 098 kg/m^3;稻种间恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为 0.42、0.35、0.016,颗粒与振动板间恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数分别为 0.52、0.52、0.01。为验证模型和仿真边界参数进行堆积角验证试验,仿真休止角为 29.9°,实测休止角为 31.3°,误差较小,所建模型可用于仿真试验。

3.2 试验设计与试验方法

为探讨振动供种装置的供种性能,设计振幅与储种盒深度的两因素试验,在前期研究和预试验基础上,确定振幅 A 范围为 0.3 ~ 0.9 mm,增量为 0.3 mm,共 3 水平;储种盒深度 H 范围为 4 ~ 19 mm,增量为 5 mm,共 4 水平。试验以振动板单列导流结构供种速率 y_1、供种速率稳定性变异系数 y_2(简称变异系数)、单列率 y_3 为试验指标,y_1、y_2 评价供种稳定性,y_3 评价单列排序稳定性,各指标测定方法如下:

统计 5 s 内由单列 V 形槽排出的稻种数量计数,各组试验重复 5 次,计算每秒排出稻种数量的平均值,不同处理下的供种速率和变异系数计算式为

$$y_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_{1i}}{j} \tag{9}$$

$$y_2 = \frac{\sqrt{\dfrac{1}{j-1}\sum_{i=1}^{n}(y_{1i} - y_1)^2}}{y_1} \times 100\% \tag{10}$$

单列率测定方法为选取某时刻单列 V 形槽内稻种,分别统计长轴方向重叠小于 50% 的稻种和全部稻种数量,计算式为

$$y_3 = \frac{n_s}{n_a} \times 100\% \tag{11}$$

式中 y_{1i}——第 i 次供种速率,粒/s

j——试验次数

n_s——V 形槽内重叠小于 50% 稻种数量

n_a——V 形槽内稻种总数量

3.3 试验结果与分析

3.3.1 试验结果回归分析

试验和方差分析结果见表 2,利用 Matlab 软件对供种速率、供种速率变异系数和单列率进行二元二次回归,经显著性检验分析,模型的决定系数 R^2 分别为 0.988 6、0.969 6、0.963 3,表明该回归模型显著且不失拟,回归方程分别为

$$y_1 = 5.78 - 21.2A + 0.06H + 59.72A^2 + 0.002\,3H^2 - 0.2AH \tag{12}$$

$$y_2 = 9.4 - 14A + 1.66H + 15.56A^2 + 0.048H^2 - 2.76AH \tag{13}$$

$$y_3 = 68.3 + 72.02A - 0.44H - 52.08A^2 - 0.009\,3H^2 - 0.81AH \tag{14}$$

方差分析结果表明,振幅 A 对供种速率 y_1 影响极为显著,对供种速率变异系数 y_2、单列率 y_3 影响显著。储种盒深度 H 对供种速率变异系数 y_2 影响显著,对单列率 y_3 影响极为显著,对供种速率 y_1 影响不显著。

3.3.2 响应曲面分析

为探讨试验因素与各指标关系,建立振幅、储种盒深度与供种速率、供种速率变异系数、单列率的响应曲面(图 8)。

表 2　振幅和储种盒深度对供种性能影响

Tab. 2　Effect of amplitude and depth of seed storage box on seed supply performance

振幅/mm	储种盒深度 4 mm			储种盒深度 9 mm			储种盒深度 14 mm			储种盒深度 19 mm		
	供种速率/(粒·s^{-1})	变异系数/%	单列率/%	供种速率/(粒·s^{-1})	变异系数/%	单列率/%	供种速率/(粒·s^{-1})	变异系数/%	单列率/%	供种速率/(粒·s^{-1})	变异系数/%	单列率/%
0.3	5.3	11	81.7	5.7	15	80.7	4.3	30	71.6	5.5	40	69.5
0.6	13.7	84	88.1	13.7	10	85.5	13.7	18	75.9	16.0	21	73.0
0.9	35.3	71	86.1	32.7	47	80.0	36.7	63	72.7	31.7	13	65.2

差异源	供种速率					变异系数					单列率				
	SS	*df*	*MS*	*F*	*P*	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P*	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P*
A	1 747.455	2	873.7	266.4	<0.01	533.4	2	266.7	8.2	0.02	58.6	2	29.3	8.3	0.02
H	1.4	3	0.5	0.1	0.9	487.2	3	162.4	5.0	0.05	500.5	3	166.8	47.1	<0.01
误差	19.7	6	3.3		195.4	6	32.6		21.2	6	3.5				

注：$P<0.01$ 为极显著；$P<0.05$ 为显著。

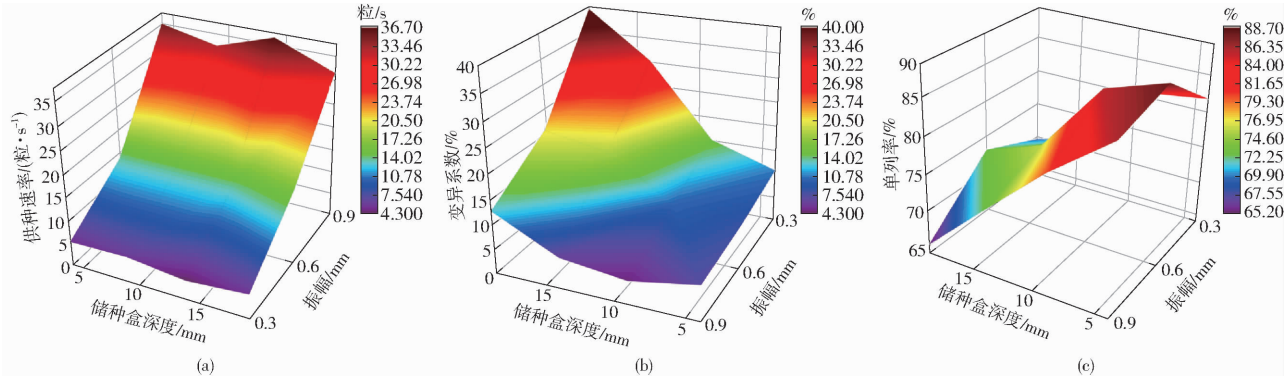


图 8　储种盒深度与振幅对供种性能影响

Fig. 8　Effect of seed tank depth and amplitude on seed supply performance

由图 8a 可知，供种速率随振幅增大而增大，振幅对供种速率影响显著；由图 8b 可知，振幅越小，储种盒深度越大，供种速率变异系数越大。其原因为振幅小，种层厚度大时，底层稻种流动能力较弱，进入 V 形槽内稻种数量不稳定造成供种不均匀；由图 8c 可知，单列率受储种盒深度影响较大，当储种盒深度大于 9 mm 时，单列率明显下降，其原因为储种盒深度增加，导种槽内侧稻种厚度增加，进入 V 形槽内稻种数量增多，进而降低了单列率；综合图 8b、8c，单列率与变异系数存在相关关系，单列率高，供种速率变异系数小。其原因为振幅一定时，V 形槽内稻种运动速度稳定，稻种分布均匀，供种速率均匀，变异系数较小。

因此，为提高振动供种均匀性，应尽量提高单列率，减小供种速率变异系数。根据 600 ~ 1 000 盘/h 的播种速度，按照最多每穴 2 粒换算为单列导流结构的供种速率范围为 8.3 ~ 13.9 粒/s，根据图 8a 确定振幅 A 为 0.4 ~ 0.6 mm，综合考虑变异系数、单列率及储种盒容量，确定储种盒深度 $H=9$ mm。根据回归模型式(12) ~ (14)，预测供种速率为 6.5 ~ 14.2 粒/s，供种速率变异系数为 11% ~ 15%，单列率为 80.5% ~ 83.7%。

4　供种性能试验

为满足不同生产率需求，可通过调节电压实现振幅的调整，从而改变供种速率。为验证压电振动式供种种装置不同振幅下的供种性能，基于优化设计参数设计了压电振动式精量播种装置(图 9)并进行试验。所用压电片控制器输出电压调节范围 0 ~ 220 V，分辨率为 1 V，输出频率为 0 ~ 440 Hz，分辨率为 0.01 Hz。试验前，手动调整压电片控制器输出频率为 47.61 Hz。根据 600 ~ 1 000 盘/h 的播种速度要求，振动供种装置振幅范围为 0.4 ~ 0.6 mm，根据式(2)振幅与电压关系式，得到压电片通电电压范围为 120 ~ 140 V。

试验过程中，利用 STM32 微控制器同时控制压电片控制器的输出电压和外槽轮转速，并使两者匹配。选用天优 998 超级杂交稻种子为试验材料，其平均湿基含水率为 10.10%，千粒质量为 25.20 g。

4.1　单列供种性能和回归模型的验证

为检验该振动板的单列供种性能和回归模型的准确性，在 600 ~ 1 000 盘/h 时计算理论供种速率为 8.3 ~ 13.9 粒/s，压电片通电范围为 120 ~ 140 V，因此在该电压范围内以 5 V 为增量任选一列进行单列

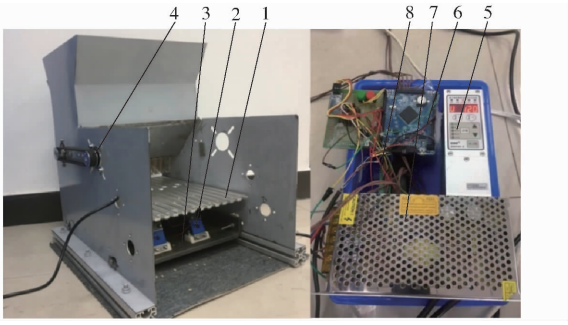


图 9 压电振动式供种装置样机

Fig. 9 Piezoelectric vibration seed supply device prototype

1. 振动板 2. 压电片 3. 底座 4. 供种电机 5. 压电片控制器 6. STM32 微控制器 7. 电源 8. 电机驱动器

试验(试验选择第 8 列),每组试验重复 5 次,统计 5 s 内单列导流结构的供种速率、供种速率变异系数和单列率,试验结果如图 10 所示。

由图 10 可知,在通电电压 120 ~ 140 V 范围内,供种速率与电压呈线性正比关系,其相关系数为 0.99,可通过控制输出电压改变供种速率;图中供种速率范围为 6.1 ~ 13.4 粒/s,供种速率变异系数为 10% ~ 14%,单列率为 77.5% ~ 84.6%,对比模型预测范围表明,供种速率误差小于 6%,供种速率变异系数误差小于 9%,单列率误差小于 4%,表明供种速率、供种速率变异系数、单列率回归模型较为准确,生产中通过控制输出电压调整供种速率,可满足不同生产率的要求,实际应用调整方便。

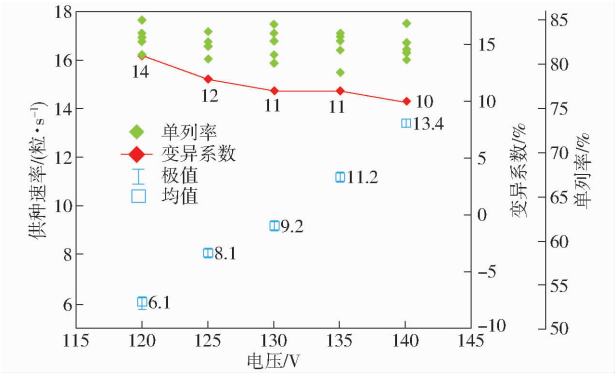


图 10 样机单列供种试验结果

Fig. 10 Prototype test results

4.2 多列供种性能试验

为验证压电振动供种装置的多列供种均匀性以及对不同稻种的适应性,试验选用天优 998 和蜀优 217 稻种,在压电片通电范围 120 ~ 140 V,以 5 V 为增量进行试验,每组试验重复 5 次,统计 5 s 内振动板上每列的供种速率平均值和列间供种速率变异系数,共计 15 列,试验结果如表 3 所示。试验结果表明,压电供种装置的列间供种速率变异系数为 3% ~ 4%,变异系数较小,表明该振动供种装置在小供种量时供种均匀性较好,满足设计要求。

表 3 天优 998 和蜀优 217 多列供种试验结果

Tab. 3 Seed feeding test results of Tianyou 998 and Shuyou 217 粒/s

品种	电压/V	列序号															变异系数/%
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
天优 998	120	5.8	6.1	6.0	6.5	6.1	5.9	5.9	5.8	5.6	5.7	6.0	5.7	5.9	5.8	6.0	4
	125	7.7	7.9	8.2	8.1	8.5	7.6	7.5	8.4	8.4	8.3	7.6	7.7	7.7	8.0	7.9	4
	130	9.4	9.5	9.2	9.8	8.7	9.3	9.2	8.9	9.4	8.9	9.1	9.7	9.7	10.0	8.9	4
	135	11.2	11.4	11.4	11.5	10.7	11.0	10.7	10.7	11.0	10.5	10.9	11.1	11.2	11.5	11.3	3
	140	13.6	13.5	13.5	13.1	14.5	14.1	12.8	13.5	13.2	13.2	13.7	13.3	13.8	13.1	12.9	3
蜀优 217	120	6.2	5.8	6.2	6.1	6.5	6.2	5.8	5.8	6.2	6.3	6.4	6.0	5.6	6.1	6.3	4
	125	8.1	8.4	7.9	7.9	7.6	8.2	8.5	8.2	8.2	7.9	8	8.1	7.9	7.9	8.4	3
	130	9.0	9.2	9.1	9.1	8.9	9.0	9.3	9.7	9.3	9.1	9.2	8.7	9.1	9.1	8.9	2
	135	10.9	11.4	11.0	11.2	11.5	11.0	10.8	11.1	11.8	11.6	11.1	10.8	11.5	11.3	11.0	3
	140	12.9	13.6	13.2	13.5	13.0	13.2	13.1	12.8	13.8	13.2	13.4	13.4	13.0	12.8	13.3	2

4.3 压电振动式精量排种器排种性能试验

为检验超级杂交稻穴盘育苗排种器压电振动供种装置的播种效果,设计了如图 11 所示的压电振动式精量排种器,压电振动供种装置同前,型孔轮采用课题组的前期研究成果[14]。试验选用前述超级杂交稻天优 998 和蜀优 217 稻种,利用 STM32 微控制器同时控制压电片控制器的输出电压和型孔轮转速使二者匹配,重复试验 5 次,每次型孔轮旋转 10 圈,统计合格率、漏播率和重播率并求平均,得到当播种速度为 600 盘/h,精密排种器 1 ~ 2 粒/穴合格率分别为 95.54% 和 94.88%,重播率分别为 1.99% 和 2.16%、漏播率分别为 2.47% 和 2.96%,满足超级杂交水稻低播量育秧播种要求。

5 结论

(1)提出一种适用于超级杂交稻稳定输送的压电振动式供种装置,确定工作频率为 47.61 Hz,压电片安装角为 15°,振幅范围为 0 ~ 1 mm。

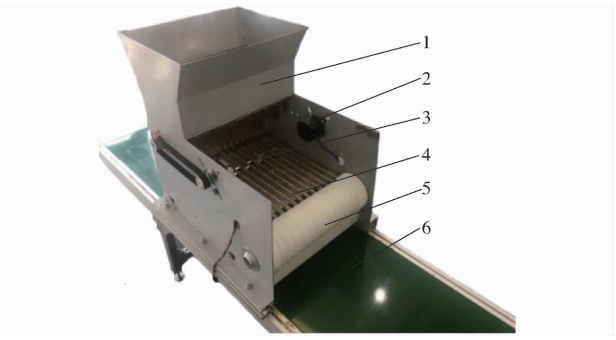


图 11　压电振动式精量排种器

Fig. 11　Piezoelectric rice precision metering device

1. 种箱　2. 排种轮电机　3. 供种轮电机　4. 振动板　5. 型孔轮及护种器　6. 输送带

(2)提出了一种导流振动板,并进行了关键参数设计和稻种在振动板上的运动规律分析,确定了影响稻种运动状态的因素。

(3)在确定的设计参数下进行 EDEM 离散元仿真,建立了振幅、储种盒深度与供种速率、供种速率变异系数、单列率间数学模型,且振幅对供种速率影响极显著,储种盒深度对单列率影响极显著。生产率 600 ~ 1 000 盘/h 时确定储种盒深度 9 mm,振幅为 0.4 ~ 0.6 mm。

(4)样机供种性能试验表明,生产率为 600 ~ 1 000 盘/h、控制电压 120 ~ 140 V 时供种速率、供种速率变异系数、单列率与仿真回归模型误差分别小于 6%、9%、4%,验证了预测模型,且各列间供种速率变异系数小于 4%。整机排种性能试验表明,生产率为 600 盘/h 时,天优 998 和蜀优 217 两种稻种 1 ~ 2 粒/穴合格率分别为 95.54% 和 94.88%,漏播率分别为 2.47% 和 2.96%,满足超级杂交稻低播量精密播种设计要求。

参　考　文　献

[1] 黄秋要. 超级稻轻耕垄作稀植高产栽培技术[J]. 现代农业科技, 2013(15): 32,35.
HUANG Qiuyao. Low yield cultivation technology of super rice[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2013(15): 32,35. (in Chinese)

[2] 尹志宽. 水稻定距、精量播种试验研究[J]. 杂交水稻, 2020,50(1): 38 - 40.
YIN Zhikuan. Experimental study on fixed distance and precision sowing of rice [J]. Hybrid Rice, 2020,50(1): 38 - 40. (in Chinese)

[3] 杨艳. 水稻栽培现状及高产栽培建议[J]. 现代农业科技, 2020(10):50 - 51.
YANG Yan. Rice cultivation status and high yield cultivation suggestions[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020(10):50 - 51. (in Chinese)

[4] 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)

[5] 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)

[6] LIU Cailing, LI Yanni, SONG Jiannong, et al. Simulation design and experiment of a directional seed-feeding device[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2017, 26: 16 - 24.

[7] 王业成,高云鹏,台文硕,等. 夹持式玉米精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019,50(9): 40 - 46.
WANG Yecheng, GAO Yunpeng, TAI Wenshuo, et al. Design and experiment of clamping maize precision seed-metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(9): 40 - 46. (in Chinese)

[8] 陈玉龙. 气吸机械复合式大豆高速精密排种器研究[D]. 长春:吉林大学, 2018.

[9] CRISTIAN I, OCTAVIAN P. A new concept for seed precision planting[J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2015 (6): 38 - 43.

[10] KARAYEL D. Performance of a modified precision vacuum seeder for no-till sowing of maize and soybean[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 104(1): 121 - 125.

[11] 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. Seed motion analysis and experimental study of electromagnetic vibration seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 1996,12(1): 81 - 86. (in Chinese)

[12] 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. Design and experiment of the precision seeder with electromagnetic vibration for rice hole tray[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(5): 32 - 34. (in Chinese)

[13] 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供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊):57 - 61.
ZHOU Haibo, LIANG Qiuyan, WEI Tianlu, et al. Design and test of the quantitative seed feeding device with external groove

wheel of two-stage vibration precision seed metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 57 - 61. (in Chinese)

[14] 刘彩玲,王超,宋建农,等. 振动供种型孔轮式非圆种子精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 108 - 115.
LIU Cailing, WANG Chao, SONG Jiannong, et al. The design and experiment of non-circular seed precision metering device with vibrating feed hole wheel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 108 - 115. (in Chinese)

[15] 杨望,杨坚,周晓蓉,等. 电磁振动排种器振动系统参数的确定[J]. 农机化研究, 2009, 31(2): 47 - 50.
YANG Wang, YANG Jian, ZHOU Xiaorong, et al. Determination of vibration system parameters of electromagnetic vibration seed metering device[J]. Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(2): 47 - 50. (in Chinese)

[16] 俞亚新,张斌,赵匀,等. 振动式排种器上稻种有序排列运动分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(5): 902 - 906.
YU Yaxin, ZHANG Bin, ZHAO Yun, et al. Analysis of the orderly arrangement and movement of rice seeds on the vibrating seed metering device [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2009, 43(5): 902 - 906. (in Chinese)

[17] 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 Chaohui, MA Xu. Measurement and analysis of seed layer vibration of super rice precision seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 68 - 72. (in Chinese)

[18] 梁丽娜,韩豹,孟繁超,等. 粳稻定向排种装置种子分离机构仿真分析[J]. 农机化研究, 2015, 37(9): 10 - 15.
LIANG Lina, HAN Bao, MENG Fanchao, et al. Simulation analysis of seed separation mechanism of Japonica directional seed metering device [J]. Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(9): 10 - 15. (in Chinese)

[19] 苏江. 振动送料器的现状及发展趋势[J]. 机械设计与制造, 2010(7): 244 - 246.
SU Jiang. Present situation and development trend of vibrating feeder [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2010(7): 244 - 246. (in Chinese)

[20] 焦其伟,崔文会,孙宝元,等. 压电式振动给料器的研制[J]. 传感器技术, 2001(4): 23 - 26.
JIAO Qiwei, CUI Wenhui, SUN Baoyuan, et al. Development of piezoelectric vibration feeder [J]. Sensor Technology, 2001(4): 23 - 26. (in Chinese)

[21] CHAO P C P, SHEN C. Dynamic modeling and experimental verification of a piezoelectric part feeder in a structure with parallel bimorph beams[J]. Ultrasonics, 2007, 46(3): 205 - 218.

[22] 杨家武,何璐璐,刘宝全,等. 基于 ANSYS 的振动盘给料器动态分析[J]. 现代科学仪器, 2011(6): 87 - 90.
YANG Jiawu, HE Lulu, LIU Baoquan, et al. Dynamic analysis of vibrating plate feeder based on ANSYS [J]. Modern Scientific Instruments, 2011(6): 87 - 90. (in Chinese)

[23] CHOI S B, LEE D H. Modal analysis and control of a bowl parts feeder activated by piezoceramic actuators[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 275(1 - 2): 452 - 458.

[24] 马超凡. 压电送料器自感知送料速度控制研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
MA Chaofan. Research on self-sensing feeding speed control of piezoelectric feeder [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)

[25] TSAI M, LEE C, HWANG S. Dynamic modeling and analysis of a bimodal ultrasonic motor[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2003, 50(3): 245 - 256.

[26] 雷小龙,杨文浩,刘礼阳,等. 杂交稻气送式集排器成穴供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 58 - 67.
LEI Xiaolong, YANG Wenhao, LIU Liyang, et al. Design and experiment of hybrid rice air delivery seed collecting and distributing device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 58 - 67. (in Chinese)