doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.09.003

水稻工厂化育秧回转拨齿式起盘装置设计与试验

陈雄飞[1,2]　陈海龙[1,2]　刘木华[1,2]　方　鹏[1,2]　许　鹏[1,2]　李　珊[1,2]

(1.江西农业大学工学院,南昌 330045;2.现代农业装备江西省重点实验室,南昌 330045)

摘要:针对水稻育秧炼苗环节起盘作业主要依赖人工完成,劳动强度大、生产效率低等问题,设计了一种水稻工厂化育秧回转拨齿式起盘装置,主要包括回转拨齿式起盘机构、提升输送机构和行走机构,机具前进过程中,回转拨齿式起盘机构连续拨起秧盘沿拨齿辊向后运动,经提升输送机构运送至后方。通过对起盘作业过程进行动力学分析,确定了拨齿数量、拨齿长度、提升输送机构倾角等参数,明确了影响起盘效果的关键因素及主要参数范围。以装置拨齿回转速度、拨齿夹角和速比为试验因素,以起盘成功率、秧盘损伤率为评价指标,运用 Box-Behnken 试验设计方法,利用土槽试验台架开展三因素三水平正交试验,通过 Design-Expert 对试验结果进行方差分析和响应曲面分析,揭示了试验因素及交互作用对起盘装置作业性能的影响规律,对构建的线性回归模型进行多目标求解优化。结果表明,当拨齿回转速度为 45.12 r/min,拨齿夹角为 88.28°,速比为 1.49 时,起盘效果最佳。以优化后的参数进行验证试验,结果表明,平均起盘成功率为 93.33%,平均秧盘损伤率为 1.67%,满足水稻育秧炼苗环节起盘作业需求。

关键词:水稻;工厂化育秧;拨齿;起盘装置

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)09-0027-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Rotary Poking-tooth Type Seedling Tray Lifting Device for Factory-style Rice Seedling Raising

CHEN Xiongfei[1,2]　CHEN Hailong[1,2]　LIU Muhua[1,2]　FANG Peng[1,2]　XU Peng[1,2]　LI Shan[1,2]

(1. *College of Engineering*, *Jiangxi Agricultural University*, *Nanchang* 330045, *China*

2. *Jiangxi Provincial Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment*, *Nanchang* 330045, *China*)

Abstract: Aiming at the problems that the seedling tray lifting operation during the hardening stage of rice seedling raising mainly relies on manual work, which leads to high labor intensity and low production efficiency, a rotary poking-tooth type seedling tray lifting device for factory-style rice seedling raising was designed. The device mainly consisted of a rotary poking-tooth type seedling tray lifting mechanism, a lifting and conveying mechanism, and a traveling mechanism. During the forward movement of the machine, the rotary poking-tooth type seedling tray lifting mechanism continuously poked up the seedling trays, which moved backward along the poking-tooth roller and were then transported to the rear by the lifting and conveying mechanism. Through dynamic analysis of the seedling tray lifting operation process, parameters such as the number of poking-teeth, the length of poking-teeth, and the inclination angle of the lifting and conveying mechanism were determined, and the key factors affecting the seedling tray lifting effect and the range of main parameters were clarified. Taking the poking-tooth rotary speed, poking-tooth included angle and speed ratio of the device as test factors, and the seedling tray lifting success rate and seedling tray damage rate as evaluation indicators, the Box-Behnken experimental design method was adopted, and three-factor and three-level orthogonal experiments were carried out by using the soil trough test bench. Analysis of variance (ANOVA) and response surface analysis were performed on the test results by Design-Expert software to reveal the influence rules of test factors and their interactions on the operating performance of the seedling tray lifting device, and multi-objective solution and optimization were carried out on the constructed linear regression model. The results showed

收稿日期:2026-01-29　修回日期:2026-02-06

基金项目:国家自然科学基金项目(32501818)和江西省农机装备研发制造推广应用一体化试点项目(YCTY202401)

作者简介:陈雄飞(1987—),男,教授,博士,主要从事水稻生产机械化关键技术与智能装备研究,E-mail:121686212@qq.com

通信作者:许鹏(1996—),男,讲师,博士,主要从事水稻生产机械化关键技术与智能装备研究,E-mail:xu.peng@139.com

that the optimal seedling tray lifting effect was achieved when the poking-tooth rotary speed was 45.12 r/min, the poking-tooth included angle was 88.28°, and the speed ratio was 1.49. Verification tests were carried out with the optimized parameters. The results indicated that the average seedling tray lifting success rate was 93.33% and the average seedling tray damage rate was 1.67%, which met the requirements of seedling tray lifting operation during the hardening stage of rice seedling raising.

Key words: rice; factory-style rice seedling raising; poking-tooth; seedling tray lifting device

0 引言

水稻是全世界主要粮食作物之一[1],中国 2024 年水稻总产量 20 753.5 万吨,是我国种植规模最大、单位面积产量最高、生产总量最多的粮食作物[2-3]。水稻机械化生产是提高综合生产能力、保障国家粮食安全的重要途径[4-6]。尽管我国水稻机械化水平已达到 98% 以上,但水稻工厂化育秧炼苗环节仍存在短板弱项[6-7]。尤其是起盘作业主要依赖人工完成,劳动强度大、生产效率低,极大制约水稻全程机械化技术发展[8-11]。因此,亟需研制适宜水稻工厂化育秧炼苗环节的起盘装置,以提升我国水稻种植机械化水平,促进水稻生产高效、优质、可持续发展,对保障国家粮食安全具有重要意义。

欧美日韩等国对起盘装置鲜有研究,其中美国、意大利和澳大利亚主要采用机械化直播和无人机撒播的水稻种植模式,日本、韩国的小规模农业经营模式不适用于发展机械化起盘[12-14]。国内学者围绕机械化起盘开展了多项研究。在铲式起盘方面,衣淑娟团队设计了一种水稻硬质育秧盘全自动起盘机提升与叠盘装置[9,15],优化了秧苗、秧盘损伤问题,但未考虑整体结构对起盘作业适用性的影响。文献[16]设计了一种用于水稻苗圃的电驱动自走式自动秧盘装载机,但需铺设专用轨道作为输送系统,仅适用于大田育秧环境。在拨齿式起盘方面,闫宇霆等[17]设计了一种拨齿辊式电驱动水稻育秧盘起盘机,解决了秧盘底部壅土问题,但未分析拨齿与秧盘接触特性对起盘效果的影响。

上述研究在解决秧苗损伤、起盘速度、秧盘底部壅土等方面取得了成果,但在起盘性能、空间结构等方面仍存在优化空间。本文设计一种水稻工厂化育秧回转拨齿式起盘装置。针对拨齿回转速度、拨齿夹角和速比对起盘成功率、秧盘损伤率的影响,设计正交组合试验,获取最优参数组合,并进行试验验证,以期为水稻工厂化育秧炼苗机械化起盘研究提供参考。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

水稻工厂化育秧回转拨齿式起盘装置主要由拨齿式起盘机构、提升输送机构、行走机构和电机等组成。拨齿式起盘机构包括回转拨齿辊、辅助辊轮和起盘铲,回转拨齿辊与辅助辊轮均固定在起盘铲内侧。具体结构如图 1 所示。

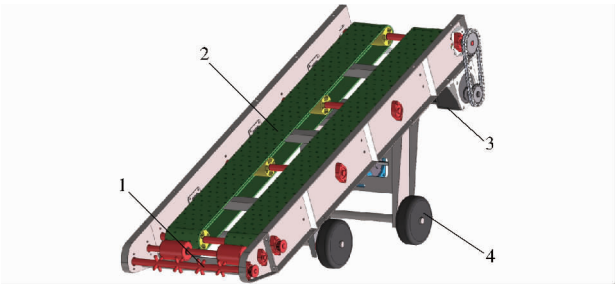


图 1 水稻工厂化育秧回转拨齿式起盘装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of rotary poking-tooth seedling tray lifting device for factory-style rice seedling raising

1. 拨齿式起盘机构 2. 提升输送机构 3. 电机 4. 行走机构

1.2 工作原理

工作时,装置与秧盘完成对行后启动电机,同步驱动行走机构与提升输送机构运行,提升输送机构同时将动力传递至拨齿式起盘机构。机具匀速前进时,电机动力输出经秧盘输送带驱动回转拨齿辊实现连续圆周运动。当拨齿转动至接触秧盘盘沿时,将秧盘向上拨起,随后下一组拨齿回转至秧盘底部,实现连续接替拨送,如图 2 所示。随机具向前行进,被拨起的秧盘沿拨齿辊向后运动,经辅助辊轮导引后,平稳过渡至提升输送机构。最终,秧盘由输送带持续输送至后方,由工作人员收取。

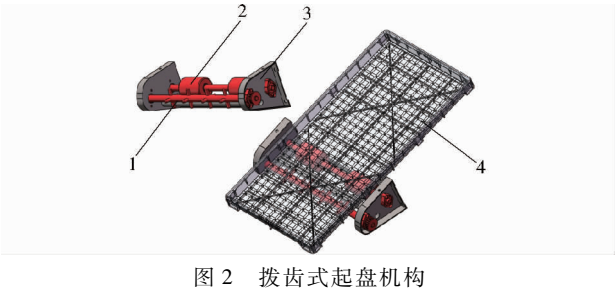


图 2 拨齿式起盘机构

Fig. 2 Poking-tooth seedling tray lifting mechanism

1. 拨齿辊 2. 起盘铲 3. 辅助辊轮 4. 秧盘

2 关键部件设计

2.1 起盘作业过程分析

水稻工厂化育秧回转拨齿式起盘装置工作过程中,拨齿与秧盘接触分为 3 个阶段:起盘初始阶段、

起盘上拨阶段和起盘拨起阶段。当拨齿与秧盘接触时，拨齿对秧盘施加力使其被拨起，当秧盘被拨起到一定角度时，秧盘开始沿着拨齿与辅助辊轮切平面向上运动，至此起盘结束。

为探究起盘过程中秧盘受力特性，对其开展系统的力学分析。在起盘初始阶段，秧盘水平放置于地面（秧盘与地面夹角为 0°），起盘需克服秧盘自身重力及秧盘与地面间的结合力。采用艾普 SF－200 型电子拉压力计，对育苗完成后的秧盘开展拉力测试，将实测值减去秧盘自身重力，即可得到秧盘与地面的结合力。经测定，秧盘拉力平均值为 42.42 N，拉力测试过程及结果如图 3、4 所示。随着拨齿持续回转，秧盘与地面夹角逐渐增大，进入起盘上拨阶段，此时仍需克服上述重力与结合力。在此基础上，继续回转至秧盘底面与拨齿辊及辅助辊轮的切平面平行时，此时秧盘与地面形成特定夹角，可顺利完成起盘动作，该过程为起盘拨起阶段。



图 3　拉力测试场景

Fig. 3　Tensile test scene

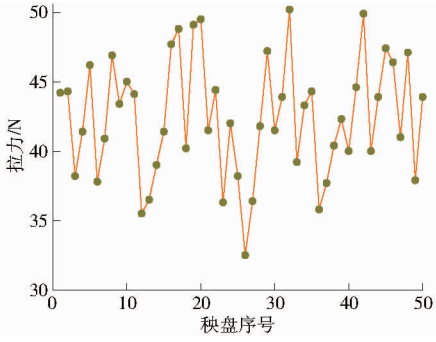


图 4　拉力测试结果

Fig. 4　Tensile test result

2.1.1　起盘初始阶段

当拨齿在回转过程中首次接触秧盘盘沿时，秧盘受到来自拨齿斜向左上方的起盘力 F_1 以及地面对其的摩擦力 f，具体受力情况如图 5 所示。定义拨齿运动方向切线与秧盘垂直底面边线之间的夹角为 θ_1，秧盘与地面的摩擦因数为 μ。当秧盘处于平衡状态时，建立平面直角坐标系：以平行于地面方向为 x 轴，向右为正；以垂直于地面方向为 y 轴，向上为正。得到秧盘沿 x 轴方向平衡方程为[18]

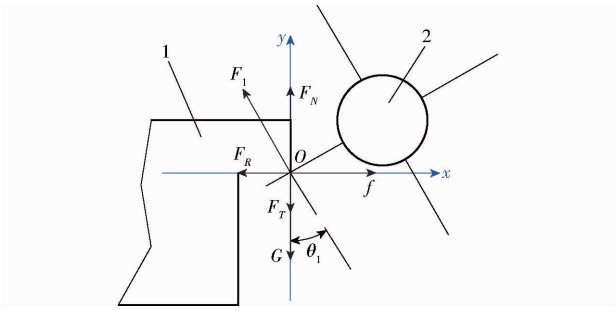


图 5　起盘初始阶段秧盘受力分析

Fig. 5　Force analysis of seedling tray during initial stage of seedling tray lifting

1. 秧盘　2. 拨齿辊

$$f=\mu F_N=F_R \tag{1}$$

$$F_R=F_1\sin\theta_1 \tag{2}$$

沿 y 轴方向平衡方程为

$$F_N+F_1\cos\theta_1=G+F_T \tag{3}$$

故根据平衡方程得

$$F_1=\frac{G+F_T}{\cos\theta_1+\dfrac{\sin\theta_1}{\mu}} \tag{4}$$

式中　F_N——地面支持力，N

F_R——起盘力沿 x 轴的分力，N

F_T——秧盘与地面的结合力，N

G——秧盘重力，N

2.1.2　起盘上拨阶段

在起盘上拨阶段，拨齿开始接触并拨动秧盘下沿，秧盘受到拨齿施加斜向左上方的起盘力 F_2。定义拨齿运动方向切线与秧盘垂直底面边线之间的夹角为 θ_2，秧盘与地面间的夹角为 α_1。与起盘初始阶段相比，摩擦力方向保持不变，但秧盘与地面夹角发生变化，具体受力情况如图 6 所示。

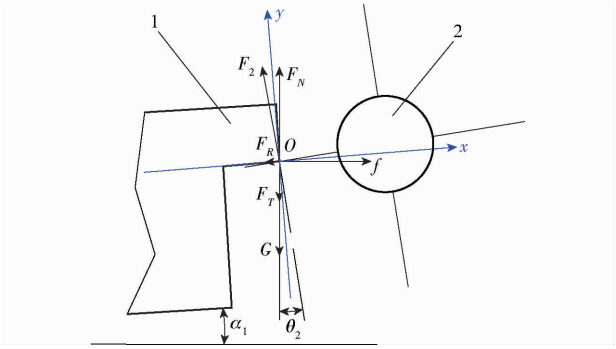


图 6　起盘上拨阶段秧盘受力分析

Fig. 6　Force analysis of seedling tray during upward lifting stage of seedling tray lifting

1. 秧盘　2. 拨齿辊

为对该阶段进行分析，定义如下坐标系：以平行于秧盘底面方向为 x 轴，指向拨齿方向为正；以垂直于秧盘底面的方向为 y 轴，向上为正。根据受力分

析,得到秧盘平衡方程[18]。沿 x 轴方向为

$$F_N\sin\alpha_1 - F_2\sin(\theta_2-\alpha_1) = (G+F_T)\sin\alpha_1 + f\cos\alpha_1 \tag{5}$$

沿 y 轴方向为

$$F_2\cos(\theta_2-\alpha_1) + F_N\cos\alpha_1 - f\sin\alpha_1 = (G+F_T)\cos\alpha_1 \tag{6}$$

联立式(5)、(6)求解得

$$F_2 = \frac{\mu(G+F_T)\cos(2\alpha_1)}{\mu\cos(2\alpha_1-\theta_2) - \sin\theta_2} \tag{7}$$

2.1.3 起盘拨起阶段

在起盘拨起阶段,拨齿成功拨起秧盘下沿并开始作用于秧盘底部,此时秧盘受到拨齿施加斜向右上方的起盘力 F_3。定义拨齿运动方向切线与秧盘垂直底面边线之间的夹角为 θ_3,秧盘与地面之间的夹角为 α_2。与前两个阶段相比,地面摩擦力方向发生改变,具体受力情况如图 7 所示。基于该阶段受力特点,建立如下坐标系:以平行于秧盘底面方向为 x 轴,指向拨齿方向为正;以垂直于秧盘底面方向为 y 轴,向上为正。得出秧盘平衡方程[18]。沿 x 轴方向为

$$F_3\sin(\alpha_2+\theta_3) + F_N\sin\alpha_2 = (G+F_T)\sin\alpha_2 + f\cos\alpha_2 \tag{8}$$

沿 y 轴方向为

$$F_3\cos(\alpha_2+\theta_3) + F_N\cos\alpha_2 + f\sin\alpha_2 = (G+F_T)\cos\alpha_2 \tag{9}$$

联立式(8)、(9)求解得

$$F_3 = \frac{\mu(G+F_T)}{\sin\theta_3 + \mu\cos\theta_3} \tag{10}$$

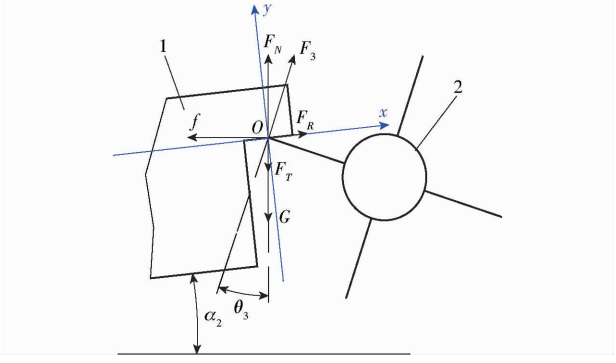


图 7 起盘拨起阶段秧盘受力分析

Fig. 7 Force analysis of seedling tray during poking and lifting stage of seedling tray lifting

1. 秧盘 2. 拨齿辊

2.2 拨齿辊结构设计

通过拨齿辊结构优化设计,可以显著提升起盘装置的工作性能,使其负荷均匀、运行平稳。同时,该设计能减少对秧盘的冲击,从而有效降低起盘过程中的秧盘损伤率[8]。

2.2.1 拨齿数量

拨齿数量直接影响起盘作业效果,拨齿数量过多或过少均会增大拨齿对秧盘的冲击。为保证拨齿辊在转动过程中的动平衡,将每个圆周截面的拨齿按 1 组 4 根($N_1=4$)、径向夹角 90°均匀布置。通过测量 9 寸标准硬质育秧盘短边盘沿加强筋的分布位置,确定拨齿安装截面间距为 75 mm。拨齿数量计算式为[19-20]

$$N = \frac{310\lambda N_1}{b} \tag{11}$$

式中 b——拨齿安装截面间距,mm

λ——间距系数,取 1

N——拨齿总数,取偶数

代入数据计算得出 $N=16$,总共为 4 组。

2.2.2 拨齿长度

根据 2.1 节起盘作业过程的分析结果可知,拨齿运动方向切线与秧盘垂直底面边线之间的夹角 θ 直接影响拨齿对秧盘施加的起盘力 F。若 θ 过大,不仅会增加拨齿的负载,还会对秧盘产生向前的冲击,导致秧盘损伤。因此,应尽可能减小该夹角。为此,拨齿辊轴的安装高度应尽量接近拨齿作用面,即秧盘盘沿下表面。经测量,该表面距地面高度 25 mm,故将其设定为拨齿辊轴安装高度。为避免拨齿在回转过程中接触地面造成拨齿断裂或损伤,拨齿回转半径应小于等于 25 mm。查阅《农业机械设计手册》[21],本文取拨齿回转半径为 25 mm,以该半径减去拨齿轴半径,可得到拨齿长度为 16.5 mm。

2.2.3 拨齿回转速度

拨齿的运动轨迹由机具的前进运动与拨齿辊的回转运动复合而成(图 8)。为分析拨齿正常工作条件,并设计其回转速度,对拨齿运动过程进行分解,以拨齿辊轴 O 为原点建立直角坐标系,以机具前进方向为 x 轴正方向,竖直向上为 y 轴正方向。

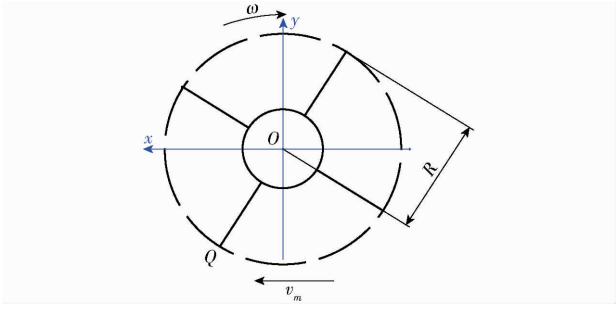


图 8 拨齿运动分析

Fig. 8 Tooth movement analysis

拨齿顶端任意一点 Q 的运动轨迹方程为[17]

$$\begin{cases} x_Q = v_m t + R\cos(\omega t) \\ y_Q = R\sin(\omega t) \end{cases} \tag{12}$$

式中　v_m——机具前进速度，m/s

ω——拨齿辊回转角速度，rad/s

R——拨齿回转半径，mm

t——时间，s

通过对时间求导得到拨齿顶端任意一点 Q 的水平和垂直分速度为

$$\begin{cases} v_x = \dfrac{\mathrm{d}x_Q}{\mathrm{d}t} = v_m - R\omega\sin(\omega t) \\ v_y = \dfrac{\mathrm{d}y_Q}{\mathrm{d}t} = R\omega\cos(\omega t) \end{cases} \tag{13}$$

式中　v_x——点 Q 水平速度，m/s

v_y——点 Q 垂直速度，m/s

为使拨齿辊能够拨起秧盘并使其向后运动，拨齿在水平方向上必须具有向后分速度。定义速比 i 为拨齿辊圆周线速度 v_0 与机具前进速度 v_m 之比（以下简称速比），即 $i = v_0/v_m$。拨齿运动轨迹随 i 值变化而改变，仅当 $i>1$ 时，拨齿运动轨迹为余摆线，且当拨齿位于余摆线最高点时，其水平分速度方向向后，这表明拨齿辊的圆周线速度需大于机具前进速度[22]，如图 9 所示。

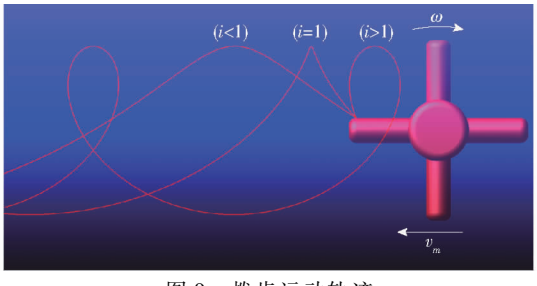


图 9　拨齿运动轨迹

Fig. 9　Tooth movement trajectory

然而在实际起盘过程中，拨齿回转时其顶端可能触及秧盘盘壁，易对秧盘造成较大冲击而导致损坏，如图 10 所示。

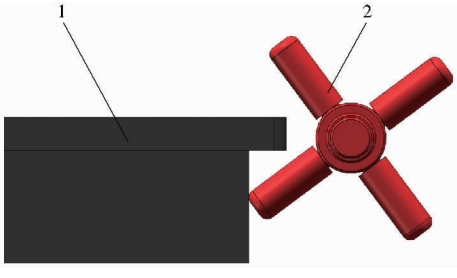


图 10　拨齿与秧盘接触示意图

Fig. 10　Schematic of contact between tooth and seedling tray

1. 秧盘　2. 拨齿

因此在实际起盘过程中，还应该满足条件：0.025 mm $\leqslant x_Q \leqslant$ 0.035 mm，y_Q = 0.025 mm。代入式(12)计算得 4.49 rad/s $\leqslant\omega\leqslant$ 6.28 rad/s，1.1 $\leqslant i \leqslant$ 1.6。

2.3　提升输送机构设计

提升输送机构作为起盘后运输秧盘的关键部件，其倾斜角度会直接影响到秧盘运输的效果[23]。如图 11 所示，通过对输送带上秧盘进行受力分析，可计算出倾斜角度 θ 的理论值。计算式为

$$\begin{cases} f_1 \geqslant G\cos\theta \\ f_1 = \mu_1 F_{N1} \\ F_N = G\sin\theta \end{cases} \tag{14}$$

式中　F_{N1}——输送带对秧盘施加的力，N

f_1——输送带对秧盘的摩擦力，N

μ_1——秧盘与输送带间的摩擦因数

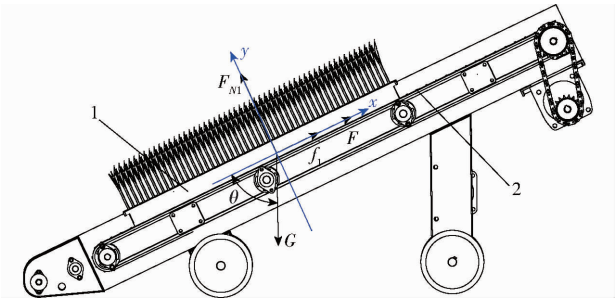


图 11　秧盘在输送带上的受力分析

Fig. 11　Force analysis of seedling tray on conveyor belt

1. 带苗秧盘　2. 输送带

输送带材料应具备耐磨、防滑及一定韧性等农业机械常用特性，本文选用聚氯乙烯材质的草纹带。草纹带与秧盘间的静摩擦因数约为 0.5，计算得理论倾斜角度 $\theta \approx 27°$。综合实际工况与结构约束，参考文献[13]以及保障从起盘机构到提升输送机构输送过程平稳，设定输送装置倾斜角度 θ 为 25°。

3　起盘性能试验

育苗移栽对我国农业发展具有重要意义[24-25]，相较于人工起盘，机械起盘可显著提高生产效率、降低劳动强度、减少秧盘损伤，有助于提高秧苗移栽成活率。为探究各因素对起盘效果的影响，搭建了综合试验平台进行系统研究。根据预试验结果，选取拨齿回转速度、拨齿排列方式（即拨齿夹角）和速比作为试验因素开展单因素试验，考察各因素对起盘成功率 Y_1 与秧盘损伤率 Y_2 的影响规律。

根据单因素试验结果，确定对指标有显著影响的因素及其合理取值范围，进而开展多因素正交试验。利用数据分析方法对试验结果进行优化处理，获取最优参数组合，确保起盘成功率和秧盘损伤率均符合实际农艺要求。

3.1　试验材料

3.1.1　秧苗准备

供试品种选取江西省水稻优质品种“长田优”，

育秧基质为江西申江农业发展有限公司的水稻机插育秧基质。依据 DB36/T 855—2023《江西省水稻工厂化育秧技术规程》,于 2025 年 8 月 15 日,在江西农业大学工程训练中心温室大棚内进行育秧与苗期管理(图 12),叶龄控制在 2.5 ~ 3.5 叶之间。



图 12 水稻毯状苗育秧

Fig. 12 Rice blanket seedling raising

3.1.2 试验仪器与设备

试验台架主要由水稻工厂化育秧回转拨齿式起盘装置与移动土槽组成,如图 13 所示。通过调节回转拨齿式起盘装置的电机转速可控制拨齿辊回转速度,通过调节移动土槽的伺服电机可控制土槽水平输送平台速度(即机具前进速度),拨齿排列方式可通过更换拨齿辊实现。其他试验仪器包括胜利 VC6236P 型转速测定仪、计时器及钢尺等。

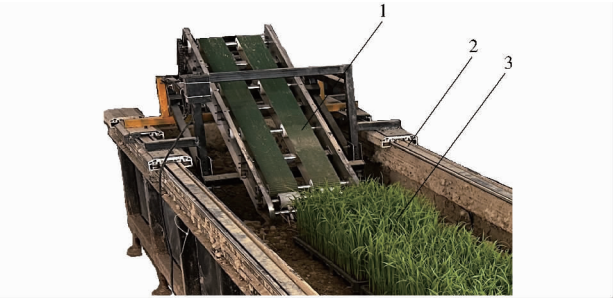


图 13 台架试验

Fig. 13 Bench test

1. 回转拨齿式起盘装置 2. 试验土槽 3. 秧苗

3.2 试验因素和评价指标

以拨齿回转速度 X_1、拨齿夹角 X_2 和速比 X_3 为试验因素,起盘成功率 Y_1 和秧盘损伤率 Y_2 为评价指标。每组试验中,被完全拨离地面并成功进入提升输送机构的秧盘数量记为成功起盘数,其与起盘总数的比值即为起盘成功率 Y_1,计算式为

$$Y_1 = \frac{N_d}{N_z} \times 100\% \tag{15}$$

式中 N_d——成功起盘数,盘

N_z——起盘总数,盘

每组试验中,出现明显裂痕或残缺的秧盘数量记为秧盘损伤数,其与起盘总数的比值即为秧盘损伤率 Y_2,计算式为

$$Y_2 = \frac{N_s}{N_z} \times 100\% \tag{16}$$

式中 N_s——秧盘损伤数,盘

3.3 单因素试验

3.3.1 试验方案

为探究各因素对起盘成功率 Y_1 和秧盘损伤率 Y_2 的影响规律,采用单因素试验法进行研究,各因素水平如表 1 所示。每组试验选取 40 盘供试秧苗,并进行 3 次重复试验。

表 1 单因素试验因素水平

Tab. 1 Factors and levels of single factor experiment

水平	因素		
	拨齿回转速度 X_1/(r·min^{-1})	拨齿夹角 X_2/(°)	速比 X_3
1	40	45	1.1
2	45	60	1.2
3	50	72	1.3
4	55	90	1.4
5	60	120	1.5

3.3.2 拨齿回转速度对起盘效果的影响

为研究拨齿回转速度 X_1 对起盘成功率 Y_1 和秧盘损伤率 Y_2 的影响,在固定拨齿夹角 X_2 为 90°、速比 X_3 为 1.3 的条件下,对拨齿回转速度 X_1 设置 40、45、50、55、60 r/min 5 个水平,并进行单因素试验。得出拨齿回转速度 X_1 对 Y_1 和 Y_2 的影响规律如图 14 所示。

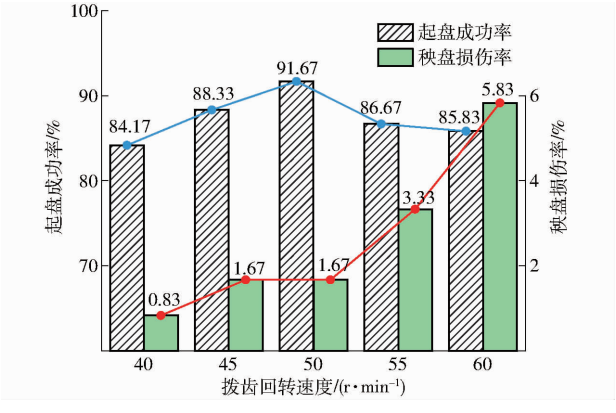


图 14 不同拨齿回转速度时起盘性能试验结果

Fig. 14 Test results of tray lifting performance at different rotary speeds of poking teeth

由图 14 可知,拨齿回转速度对起盘效果影响显著。低转速下,拨齿对秧盘的拨动力不足,致使部分秧盘未能完全脱离地面,影响起盘作业完整性;高转速时,拨齿与秧盘接触时间过短,较大冲击力导致拨送过程失稳,从而降低起盘成功率。因此,随拨齿回转速度增大,起盘成功率呈先增后降趋势,并在速度

为 50 r/min 时达到最大值 91.67%。与此同时，较高转速下拨齿对秧盘盘沿及底部产生的机械冲击显著增强，易导致秧盘出现裂痕或局部残缺，故秧盘损伤率随拨齿回转速度升高而增加。

3.3.3　拨齿夹角对起盘效果的影响

为研究拨齿夹角 X_2 对起盘成功率 Y_1 和秧盘损伤率 Y_2 的影响，在固定拨齿回转速度 X_1 为 50 r/min，速比 X_3 为 1.3 的条件下，对拨齿夹角 X_2 设置 45°、60°、72°、90°、120°共 5 个水平，并进行单因素试验。根据试验结果分析，得出拨齿夹角 X_2 对 Y_1 和 Y_2 的影响规律如图 15 所示。

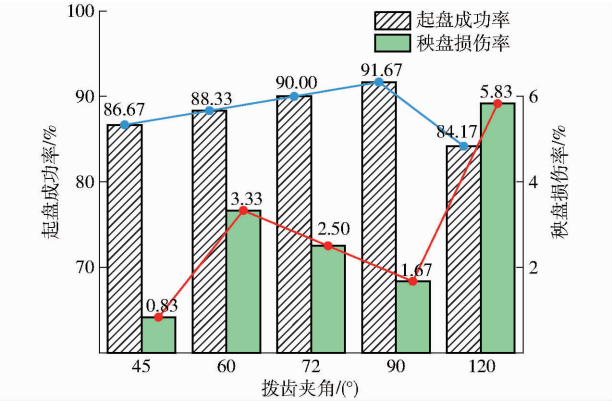


图 15　不同拨齿夹角时起盘性能试验结果

Fig. 15　Test results of tray lifting performance at different poking-teeth included angles

由图 15 可知，拨齿夹角的变化对起盘作业效果产生明显影响。随着夹角增大，拨齿与秧盘的接触面积及有效拨动力臂相应增加，有利于克服秧盘自身重力及其与地面结合力，从而提升拨起过程稳定性；当夹角超过 90°后，接触方式未变化，起盘成功率增长幅度趋于平缓。因此，起盘成功率随拨齿夹角的增大呈逐步上升趋势，并在夹角为 90°时达到最大值 91.67%。与此同时，秧盘损伤率亦随夹角增大而整体升高，说明在提升起盘成功率的同时需考虑夹角增大对秧盘造成机械负荷增加的影响。

3.3.4　速比对起盘效果的影响

为研究速比 X_3 对起盘成功率 Y_1 和秧盘损伤率 Y_2 的影响，在固定拨齿回转速度 X_1 为 50 r/min、拨齿夹角 X_2 为 90°的条件下，对速比 X_3 设置 1.1、1.2、1.3、1.4、1.5 共 5 个水平，进行单因素试验。根据结果分析，得出速比 X_3 对 Y_1 和 Y_2 的影响规律如图 16 所示。

由图 16 可知，因拨齿运动轨迹为余摆线，其水平分速度向后，能将秧盘稳定拨送至提升输送机构。随着速比增大，拨齿产生的向后输送作用力增强，秧盘脱离地面后不易发生偏移，有利于提升起盘成功率。因此，起盘成功率随速比增加呈逐步上升趋势，

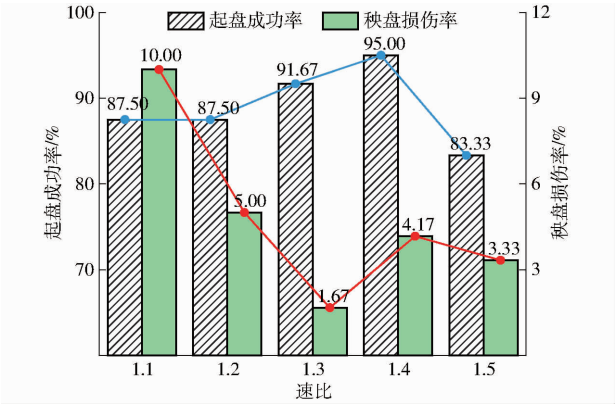


图 16　不同速比时起盘性能试验结果

Fig. 16　Test results of tray lifting performance at different speed ratios

并在速比为 1.4 时达到最大值 95.00%。与此同时，速比增大导致机具前进速度相对降低，延长了拨齿与秧盘的接触时间，使冲击载荷得以分散。此外，拨齿在卡入秧盘盘沿凹槽后，低速度脱离可避免弹性变形升级为塑性变形，从而减少破损。鉴于此，秧盘损伤率随速比增加呈现整体下降趋势。

3.4　正交试验

3.4.1　试验方案

为探究拨齿回转速度 X_1、拨齿夹角 X_2 和速比 X_3 对起盘装置起盘性能的影响，寻找最佳参数组合，本研究结合单因素试验结果与实际需求，确定各因素取值范围。采用 Box－Behnken 试验设计法，开展三因素三水平响应面试验，试验效果如图 17 所示。



图 17　起盘试验

Fig. 17　Seedling tray lifting test

记录每组数据并分析试验结果，得出各因素对起盘成功率 Y_1 和秧盘损伤率 Y_2 的影响规律，试验因素编码如表 2 所示。

3.4.2　试验结果与分析

开展了 17 组三因素三水平响应面试验，试验结果如表 3 所示，x_1、x_2、x_3 为因素编码值。

利用 Design-Expert 软件对试验结果进行多元回归拟合，建立起盘成功率 Y_1 和秧盘损伤率 Y_2 对拨齿回转速度、拨齿夹角和速比的响应面回归模型，并进行方差分析，结果如表 4 所示。

表 2 正交试验因素编码

Tab. 2 Orthogonal test factors coding

编码	因素		
	拨齿回转速度/(r·min^{-1})	拨齿夹角/(°)	速比
-1	45	60	1.3
0	50	72	1.4
1	55	90	1.5

表 3 试验方案与结果

Tab. 3 Experimental scheme and results

试验号	因素			起盘成功率 Y_1/%	秧盘损伤率 Y_2/%
	x_1	x_2	x_3		
1	-1	-1	0	92.5	0
2	1	-1	0	85.0	5.0
3	-1	1	0	90.0	2.5
4	1	1	0	90.0	10.0
5	-1	0	-1	92.5	2.5
6	1	0	-1	92.5	17.5
7	-1	0	1	92.5	0
8	1	0	1	82.5	5.0
9	0	-1	-1	95.0	10.0
10	0	1	-1	95.0	5.0
11	0	-1	1	87.5	0
12	0	1	1	95.0	5.0
13	0	0	0	87.5	7.5
14	0	0	0	85.0	7.5
15	0	0	0	87.5	10.0
16	0	0	0	90.0	5.0
17	0	0	0	90.0	7.5

表 4 模型方差分析

Tab. 4 Model analysis of variance

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
起盘成功率 Y_1	模型	202.81	9	22.53	7.11	0.008 5 **
	x_1	38.28	1	38.28	12.08	0.010 3 *
	x_2	12.50	1	12.50	3.94	0.087 4
	x_3	38.28	1	38.28	12.08	0.010 3 *
	x_1x_2	14.06	1	14.06	4.44	0.073 2
	x_1x_3	25.00	1	25.00	7.89	0.026 2 *
	x_2x_3	14.06	1	14.06	4.44	0.073 2
	x_1^2	3.22	1	3.22	1.02	0.346 8
	x_2^2	21.32	1	21.32	6.72	0.035 8 *
	x_3^2	34.80	1	34.80	10.98	0.012 9 *
	残差	22.19	7	3.17		
	失拟项	4.69	3	1.56	0.357 1	0.788 0
	误差	17.50	4	4.37		
	总和	225.00	16			
秧盘损伤率 Y_2	模型	294.58	9	32.73	7.72	0.006 7 **
	x_1	132.03	1	132.03	31.13	0.000 8 **
	x_2	7.03	1	7.03	1.66	0.238 8
	x_3	78.13	1	78.13	18.42	0.003 6 **
	x_1x_2	1.56	1	1.56	0.368 4	0.563 0
	x_1x_3	25.00	1	25.00	5.89	0.045 6 *
	x_2x_3	25.00	1	25.00	5.89	0.045 6 *
	x_1^2	3.70	1	3.70	0.872 6	0.381 3
	x_2^2	20.15	1	20.15	4.75	0.065 7
	x_3^2	0.411 2	1	0.411 2	0.097 0	0.764 61
	残差	29.69	7	4.24		
	失拟项	17.19	3	5.73	1.83	0.281 3
	误差	12.50	4	3.13		
	总和	324.26	16			

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

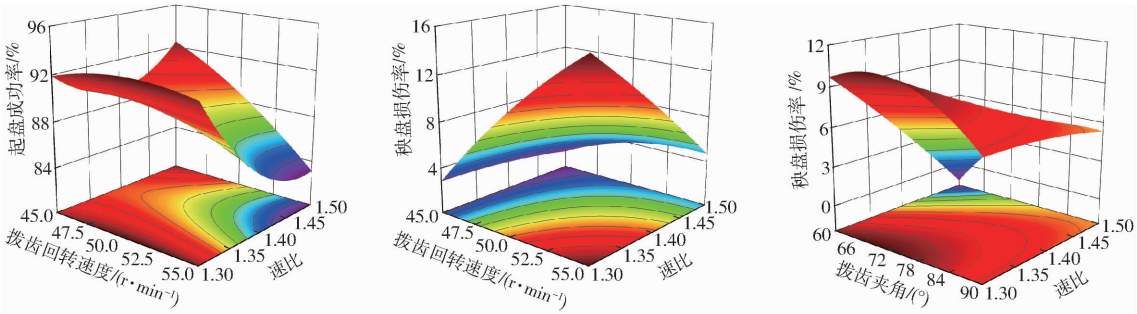
由表 3 和表 4 结果可知，起盘成功率为 82.5% ~ 95.0%，平均值为 90.0%；秧盘损伤率为 0 ~ 17.5%，平均值为 5.88%。起盘成功率和秧盘损伤率模型 $P<0.01$，影响极显著，表明回归模型方程拟合较好，可信度高；失拟项 $P>0.1$，均不显著，表明回归模型具有很高的拟合度。各因素对起盘成功率影响的重要性依次为：速比、拨齿回转速度、拨齿夹角；各因素对秧盘损伤率影响的重要性依次为：拨齿回转速度、速比、拨齿夹角。对试验结果进行回归分析，剔除不显著交互项和平方项后，得到拨齿回转速度 x_1、拨齿夹角 x_2、速比 x_3 对起盘成功率 Y_1 和秧盘损伤率 Y_2 的回归方程分别为

$$\begin{cases} Y_1 = 88 - 2.19x_1 + 1.25x_2 - 2.19x_3 - \\ \quad 2.5x_1x_3 + 2.25x_2^2 + 2.88x_3^2 \\ Y_2 = 7.5 + 0.46x_1 + 0.937\,5x_2 - 3.13x_3 - \\ \quad 2.5x_1x_3 + 2.5x_2x_3 \end{cases} \tag{17}$$

根据响应面分析极显著因素交互作用对起盘成功率和秧盘损伤率的影响，如图 18 所示。

图 18a、18b 为拨齿夹角取 72°时，拨齿回转速度与速比交互作用对起盘成功率和秧盘损伤率的响应曲面。结果表明，在拨齿回转速度保持不变条件下，速比增大导致机具前进速度降低，前进相同距离所需时间延长，使得拨齿在接触到秧盘盘沿完成一次拨起动作后、下一拨齿运动至同一位置时所需回转的圈数增加。此时，后续拨齿无法准确作用于秧盘底部，而是再次接触并推动盘沿，影响拨起的有效性和稳定性。若速比保持不变，拨齿回转速度升高则会增强对秧盘的机械冲击，导致起盘成功率整体呈现下降趋势，致使秧盘损伤率上升。

图 18c 为拨齿回转速度为 50 r/min 时，速比和拨齿夹角交互作用对秧盘损伤率的响应曲面。结果表明，在拨齿夹角相同情况下，随着速比增加，机具前进速度降低，拨齿与秧盘的相对运动减缓，有利于减轻拨齿嵌入盘沿凹槽时所引发的冲击。若拨齿卡入凹槽后移动时脱离速度过快，易导致秧盘盘沿由弹性变形升级为塑性变形，从而加剧秧盘损伤。因



(a) X_2=72°,起盘成功率　(b) X_2=72°,秧盘损伤率　(c) X_1=50 r/min,秧盘损伤率

图 18　各因素交互作用对起盘成功率、秧盘损伤率影响的响应面

Fig. 18　Response surfaces of effects of interactions between various factors on seedling tray lifting success rate and seedling tray damage rate

此,随着速比增大,秧盘损伤率整体呈下降趋势。

本研究以最大化起盘成功率和最小化秧盘损伤率为优化目标,以拨齿回转速度、拨齿安装夹角及速比为优化变量。基于构建的线性回归模型进行多目标优化,优化目标函数与约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant x_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant x_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant x_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{18}$$

利用 Design-Expert 软件的 Optimization 模块对目标函数进行求解,并结合实际作业情况,综合优化得出较优参数组合为:拨齿回转速度 45.12 r/min、拨齿夹角 88.28°、速比 1.49。此时,对应的起盘成功率为 95.27%,秧盘损伤率为 2.93%。

3.5　验证试验

对优化求解结果取整,得到拨齿回转速度为 45 r/min、拨齿夹角为 90°、速比为 1.5 的参数组合。进行 3 次重复验证试验,结果如表 5 所示:起盘成功率为 93.33%,与理论优化值相差 1.93 个百分点;秧盘损伤率为 1.67%,较理论优化值低 1.26 个百分点。结果表明,所建模型具有较好的可靠性,且优化后的起盘装置能满足实际作业要求,达到预期设计目标。

表 5　验证试验结果

Tab. 5　Verification experiment results　%

试验号	起盘成功率	秧盘损伤率
1	92.5	0
2	95.0	2.5
3	92.5	2.5
平均值	93.33	1.67

4　结论

(1)设计了一种适用于水稻工厂化育秧的回转拨齿式起盘装置,对起盘作业过程进行动力学分析,结合拨齿数量、拨齿长度、提升输送机构倾斜角度等参数,明晰了影响起盘效果(起盘成功率、秧盘损伤率)的关键因素,并通过单因素试验确定了各参数的取值范围。

(2)采用三因素三水平响应面试验方法,分析了拨齿回转速度、拨齿夹角和速比对起盘成功率、秧盘损伤率的影响,得出参数优化组合为:拨齿回转速度 45.12 r/min、拨齿夹角 88.28°、速比 1.49,此时,起盘成功率为 95.27%,秧盘损伤率为 2.93%,起盘效果良好。

(3)验证试验结果表明,当回转拨齿式起盘装置工作参数组合为:拨齿回转速度 45 r/min、拨齿安装夹角 90°、速比 1.5,此时,起盘成功率为 93.33%,秧盘损伤率为 1.67%,可为起盘装置优化设计提供理论依据。

参　考　文　献

[1]　王宣茗,官玉,姜雪,等. 超细水稻秸秆还田对干湿交替稻田水分生产率、水稻产量及品质的影响[J]. 农业工程学报,2025,41(8):97-108.
WANG Xuanming, GUAN Yu, JIANG Xue, et al. Effects of ultra-fine rice straw return to the field on water productivity, rice yield and quality in paddy fields on alternating dry and wet conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(8): 97-108. (in Chinese)

[2]　KULESHWAR P S, AUNDY K, ASHARANI P, et al. Rice blast lesions: an unexplored phyllosphere microhabitat for novel antagonistic bacterial species against magnaporthe oryzae[J]. Microbial Ecology, 2021, 81: 731-745.

[3]　刘俊杰,严晓斌,张美怡,等. 中国农作物秸秆资源产量分布及利用分析[J]. 农业资源与环境学报,2025,42(3):751-760.
LIU Junjie, YAN Xiaobin, ZHANG Meiyi, et al. Analysis of yield distribution and utilization of crop straw resources in China

[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment,2025,42(3):751 – 760. (in Chinese)

[4] 吴海霞,郝含涛,史恒通,等. 农业机械化对小麦全要素生产率的影响及其空间溢出效应[J]. 农业技术经济,2022,328(8):50 – 68.
WU Haixia, HAO Hantao, SHI Hengtong, et al. Effect of agricultural mechanization on total factor productivity of wheat and its spatial spillover effect[J]. Journal of Agrotechnical Economics,2022,328(8):50 – 68. (in Chinese)

[5] 江泽林. 把握新时代农业机械化的基本特性[J]. 农业经济问题,2019,479(11):4 – 14.
JIANG Zelin. Grasping the basic characteristics of agricultural mechanization in the new era[J]. Issues in Agricultural Economy,2019,479(11):4 – 14. (in Chinese)

[6] 李泽华,马旭,李秀昊,等. 水稻栽植机械化技术研究进展[J]. 农业机械学报,2018,49(5):1 – 20.
LI Zehua, MA Xu, LI Xiuhao, et al. Research progress of rice transplanting mechanization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(5):1 – 20. (in Chinese)

[7] 虞佳佳,李玉,周延锁,等. 基于改进 YOLO v5n 的工厂化育秧田间铺盘装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(8):71 – 80,116.
YU Jiajia, LI Yu, ZHOU Yansuo, et al. Design and testing of field disk spreading device based on improved YOLO v5n[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(8):71 – 80,116. (in Chinese)

[8] 闫宇霆,李渤海,衣淑娟,等. 水稻硬质秧盘起盘机拨齿辊静力学分析与试验[J]. 农机化研究,2025,47(7):25 – 34.
YAN Yuting, LI Bohai, YI Shujuan, et al. Static analysis and experiment on the gear shifting roller of the rice hard seedling tray lifting machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2025,47(7):25 – 34. (in Chinese)

[9] 衣淑娟,王鹏,李衣菲,等. 水稻硬质育秧盘全自动起盘机提升与叠盘装置研究[J]. 农业机械学报,2024,55(7):168 – 178.
YI Shujuan, WANG Peng, LI Yifei, et al. Lifting and stacking device of automatic tray lifting machine for rice hard tray seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(7):168 – 178. (in Chinese)

[10] 李永春,刘明普,汪益林,等. 电动摆盘覆土机激光走直系统设计与试验[J]. 农机化研究,2023,45(3):94 – 98.
LI Yongchun,LIU Mingpu,WANG Yilin,et al. Design and test of laser straightening system of electric wobble plate covering machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2023,45(3):94 – 98. (in Chinese)

[11] 谢方平,杨靖,符志勇,等. 2BP – 2000 型水稻育秧播种机分盘装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(2):1 – 11.
XIE Fangping, YANG Jing, FU Zhiyong, et al. Design and experiment of tray splitting device for 2BP – 2000 rice seed plate sowing machine[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(2):1 – 11. (in Chinese)

[12] 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)

[13] 李虎. 水稻盘育秧起苗装置设计[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2023.
LI Hu. Design of rice plate seeding plant[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University,2023. (in Chinese)

[14] 李晓琳. 农药喷洒多旋翼无人机避障设计与实现[D]. 沈阳:东北大学,2016.
LI Xiaolin. Design and implementation of obstacle avoidance system of pesticide spraying multi-rotor UAV[D]. Shenyang: Northeastern University,2016. (in Chinese)

[15] YI S J, ZHANG G, LI Y F, et al. Design and experiment of a fully automatic plate lifting machine for rice hard disk seedling cultivation[J]. Agriculture,2023,13(10):1 – 19.

[16] CHIU Y C, WU G J, CHEN C H. Development of a generator-powered self-propelled automatic tray loading/unloading machine for use in rice nurseries[J]. Engineering in Agriculture,Environment and Food,2019,12:256 – 263.

[17] 闫宇霆,衣淑娟,李渤海,等. 拨齿式电驱动水稻育秧盘起盘机设计与试验[J]. 农机化研究,2024,46(5):210 – 215.
YAN Yuting, YI Shujuan, LI Bohai, et al. Design and test of toggle gear type electric drive rice transplanting tray starter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2024,46(5):210 – 215. (in Chinese)

[18] 王云喆. 秸秆饲草方捆捡拾装置设计与试验研究[D]. 长春:吉林大学,2024.
WANG Yunzhe. Design and experimental study of straw and forage square bales pick-up machine[D]. Changchun: Jilin University,2024. (in Chinese)

[19] 张佳,杜亚坤,马小雯,等. 基于阿基米德曲线的螺旋拨齿式捡石机设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(1):290 – 300.
ZHANG Jia, DU Yakun, MA Xiaowen, et al. Design and experiment of spiral toothed stone picking machine based on archimedes curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025, 56(1): 290 – 300. (in Chinese)

[20] 廖庆喜,谢昊明,张青松,等. 驱动圆盘犁与双刃型旋耕刀组合式耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(7):99 – 110,195.
LIAO Qingxi, XIE Haoming, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of driven disc plow and double-edged rotary tillage combined tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023, 54(7):99 – 110,195. (in Chinese)

(下转第 81 页)

英文)，2025，6(2)：1－23.
WANG Dezhi，WANG Yanxin，WANG Xiaochan，et al. Management and harvesting technologies in agricultural robotics：current status，challenges and future developments[J]. Journal of Intelligent Agricultural Equipment，2025，6(2)：1－23.(in Chinese)
[31] 陈永，高晓勋，金鑫，等. 油莎豆排种离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(12)：58－69.
CHEN Yong，GAO Xiaoxun，JIN Xin，et al. Calibration and analysis of seeding parameters of *Cyperus esculentus* seeds based on discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(12)：58－69.(in Chinese)
[32] 徐效伟，魏海，颜建春，等. 花生荚果离散元仿真参数标定[J]. 中国农机化学报，2022，43(11)：81－89.
XU Xiaowei，WEI Hai，YAN Jianchun，et al. Parameter calibration of peanut pods discrete element simulation[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization，2022，43(11)：81－89.(in Chinese)
[33] 蒋奕蕾. 球柱形颗粒堆积的数值模拟研究[D]. 鞍山：辽宁科技大学，2024.
JIANG Yilei. Numerical simulation study on spherocylinder particle packing[D]. Anshan：University of Science and Technology Liaoning，2024.(in Chinese)
[34] 余参参，段宏兵，蔡兴奎，等. 基于离散元仿真参数的微型薯物料测定[J]. 华中农业大学学报，2021，40(1)：210－217.
YU Cancan，DUAN Hongbing，CAI Xingkui，et al. Discrete element simulation parameters-based measurement of materials for potato minituber[J]. Journal of Huazhong Agricultural University，2021，40(1)：210－217.(in Chinese)
[35] ZHENG Jinming，WANG Lin ，WANG Xiaochao，et al. Parameter calibration of cabbages (*Brassica oleracea* L.) based on the discrete element method[J]. Agriculture，2023，13：555.
[36] 程子文，杨德秋，刘萌萌，等. 基于离散元仿真的马铃薯收获机集薯装袋过程研究[J]. 农业机械学报，2024，55(增刊 2)：62－74.
CHENG Ziwen，YANG Deqiu，LIU Mengmeng，et al. Bagging process of potato harvester based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(Supp.2)：62－74.(in Chinese)
[37] KAFASHAN J，WIACEK J，RAMON H，et al. Modelling and simulation of fruit drop experiments by discrete element method[J]. Biosystems Engineering，2021，212：228－240.

(上接第 36 页)

[21] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
[22] 潘烤鑫,张庆,尤泳,等.小粒径苜蓿种子机械梳脱增流式收获机设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(2):342－356.
PAN Kaoxin，ZHANG Qing，YOU Yong，et al. Design and experiment of flow-enhanced mechanical combining harvester for small-seeded alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(2):342－356.(in Chinese)
[23] 闫宇霆.自走式单行水稻硬质秧盘起盘机设计与试验研究[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2023.
YAN Yuting. Design and experimental study of a self propelled single row rice hard seedling plate lifting machine[D]. Daqing：Heilongjiang Bayi Agricultural University,2023.(in Chinese)
[24] 俞高红,王磊,孙良,等.大田机械化移栽技术与装备研究进展[J].农业机械学报,2022,53(9):1－20.
YU Gaohong，WANG Lei，SUN Liang，et al. Advancement of mechanized transplanting technology and equipments for field crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(9):1－20.(in Chinese)
[25] 俞亚新,潘一隆,王通,等.播量可调式水稻毯苗条播机滚筒排种器设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(10):310－320.
YU Yaxin，PAN Yilong，WANG Tong，et al. Design and test of drum seed metering device for drill seeding of rice blanket seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(10):310－320.(in Chinese)