doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.09.018

大豆育种种绳铺设机导种-开沟系统设计与试验

侯守印　金　博　黄　昊　张涵飞　纪文义
（东北农业大学工程学院，哈尔滨 150030）

摘要：针对大豆育种中传统播种技术效率低、种绳易松脱断裂及开沟阻力大等问题，本文设计了一种集成阻尼控制与指数型导曲线的导种-开沟系统。通过力学分析与离散元仿真，揭示了导绳装置阻尼力矩动态调节机制，提出了基于指数函数的滑尖导曲线优化方法，完成了离心增力式负相关摩擦阻尼器及种绳开沟器等核心部件设计。基于三因素五水平正交旋转组合试验，以导绳管外径、入土角、播深为试验因素，结合 EDEM 仿真平台解析工作阻力与土壤扰动的交互规律。结果表明：导绳管外径对各性能指标影响极显著（$P<0.01$），最优参数组合为：导绳管外径 30 mm、入土角 32°、播深 45 mm，此时工作阻力降低至 360.1 N，土壤扰动系数控制在 23.4%。田间试验验证表明，优化后装置工作阻力小于 369 N，种沟土壤扰动系数小于 29%。增设阻尼装置的种绳铺设机种绳松脱长度均小于 26 mm 且无种绳断裂现象，满足大豆育种高精度播种需求。

关键词：大豆育种机械；种绳铺设机；阻尼装置；离散元仿真；参数优化
中图分类号：S223.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)09-0197-11　　**OSID**：

Design and Test of Soybean Breeding Seed Rope Laying Machine Guide-seed – Ditching System

HOU Shouyin　JIN Bo　HUANG Hao　ZHANG Hanfei　JI Wenyi
(*College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: Aiming to address the low efficiency of conventional sowing techniques in soybean breeding, as well as frequent seed-rope loosening/breakage and excessive furrow-opening resistance, a seed guide – ditching system integrating damping control with an exponential guide curve was developed. Through mechanical analysis combined with discrete element method (DEM) simulations, the dynamic regulation mechanism of the damping torque in the seed-rope guiding device was elucidated, and an exponential-function based optimization method for the nose guide curve was proposed. A centrifugal force-amplified, negatively correlated friction damper and a seed-rope furrow opener were designed as the core components. A three-factor, five-level orthogonal rotational combination experiment was conducted with guiding-tube outer diameter, entry angle, and seeding depth as the experimental factors, while EDEM simulations were used to clarify the interactive effects of these factors on draft force and soil disturbance. The results showed that the guiding-tube outer diameter had a highly significant effect on all performance indices ($P<0.01$). The optimal parameter combination was a 30 mm outer diameter of the guide tube, 32° entry angle, and 45 mm seeding depth, under which the draft force was reduced to 360.1 N and the soil disturbance coefficient was controlled at 23.4%. Field validation confirmed that the optimized device operated with a draft force below 369 N and produced furrows with a soil disturbance coefficient below 29%. With the damping device installed, the seed-rope loosening length remained below 26 mm and no seed-rope breakage occurred, meeting the high-precision sowing requirements of soybean breeding.

Key words: soybean breeding machinery; seed rope laying machine; damping device; discrete element simulation; parameter optimization

收稿日期：2025-11-05　修回日期：2025-12-11
基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFD2300103)和财政部和农业农村部：国家现代农业产业技术体系项目(CARS-04)
作者简介：侯守印(1986—)，男，副教授，博士，主要从事保护性耕作技术与装备研究，E-mail：499870929@qq.com
通信作者：纪文义(1970—)，男，高级工程师，主要从事农业机械装备研究，E-mail：jwy730306@163.com

0 引言

大豆作为全球重要的粮食、油料和经济作物，在保障粮食安全、优化农业种植结构及推动农业可持续发展中具有重要作用[1-3]。而小区育种是大豆提高产量、优化品质与增强抗逆性的重要途径[4]。大豆小区育种田间试验贯穿优良品种研发全程，通过评估不同环境下的生长表现与适应性，为育种提供关键数据[5]。然而，传统人工或半机械化播种方式存在效率低、均匀性差等问题，导致试验精度较低[6]。亟需研发高效精准的大豆育种播种机械以提升试验可靠性。

种绳铺设技术起源于日本 20 世纪 60 年代的水稻育苗移栽领域[7]，其核心原理是将种子按预设间距嵌入可降解纤维编织的种绳中，通过机械化设备实现种绳的同步开沟、铺设与覆土作业[8]。与传统直播技术相比，该技术通过物理限位确保种子空间分布的精确性，有效避免了漏播、重播现象，减少了种子用量[9]，黄小毛等[10]通过田间试验证明，采用种绳铺设技术降低了劳动强度和成本。

目前种绳铺设技术在小籽粒作物上的研究和应用较为成熟，但对于中大籽粒作物的研究和应用相对薄弱。种绳铺设技术的应用高度依赖配套的高效播种设备。导绳开沟器作为核心部件，其性能优劣直接决定种绳铺设的质量与效率[11]。近年来研究者对种绳开沟器进行了广泛的研究。张亚双[12]设计一种顶部带有漏斗形状承接口的种绳开沟器，降低种绳与开沟器之间的摩擦，但开沟器会被土壤等杂物堵塞。任文涛等[13]研究出一种新型防堵种绳开沟器，并对其曲面和翼板进行优化处理，有效的解决堵塞问题，但缺少对放绳处的磨损研究。韩双等[14]设计了一种适配手扶式水稻种绳直播机的开沟器，可以灵活调整开沟深度，并对开沟器强度进行校核。张宝峰[15]优化了种绳开沟器刃口曲线，选用指数型曲线以降低工作阻力，并通过离散元仿真方法进行验证，但开沟器的强度没有验证。DEPPERMANN 等[16]将双圆盘开沟器应用于种绳铺设装置上，并在种沟的正后方放置了种绳带轮来保证种绳位置，但双圆盘开沟器存在工作阻力大、入土困难等问题。LV 等[17]研制了一种导绳装置，该装置由线轮和 4 个交叉放置的转管组成，安装于种绳开沟器正上方，有效地减少了种绳的磨损，防止种绳断裂。

基于上述研究，为解决中大籽粒种绳开沟器存在种绳磨损、过载断裂以及工作阻力较大等问题，本文面向大豆小区育种环境，设计一种新型的导种-开沟系统。基于离散元法(DEM)建立开沟器-土壤相互作用模型，模拟不同开沟参数下的土壤运动行为，确定开沟器入土角、开沟器刃口曲率等关键设计参数；设计阻尼装置精准控制摩擦力矩，抑制导绳盘惯性转动，确保种绳在停车工况下无松脱或空转，二者协同可实现种绳的高效铺设。依据仿真优化的关键参数，选用高强度、耐磨损的优质材料制造样机主体结构，并通过在黑龙江地区开展多工况田间试验，系统评估装置的作业质量、能耗效率与可靠性指标。

1 总体结构与工作原理

1.1 结构组成

大豆育种种绳铺设机结构如图 1 所示。主要由施肥系统、机架、地轮、铺设单体组成，其中，铺设单体包括四杆仿形机构、导绳装置、开沟器、控制系统、覆土镇压装置等部分，导绳装置与开沟器构成了导绳-开沟系统，决定了种绳铺设效率与工作质量。施肥系统中的肥铲、铺设单体均与机架刚性连接，通过移动卡具调整相对位置，满足不同行距和种肥间距农艺要求。铺设单体与机架固连的四杆仿形机构可对地表进行仿形，保证种绳铺设深度一致性，通过前置仿形轮高度调整可实现不同铺设深度，同时对地表进行开沟前镇压处理进一步保证种绳铺设质量。导绳装置主要由阻尼器和导绳辊组成，其固连在铺设装置上。阻尼器可有效防止导绳盘空转及机具停车时惯性转动。控制系统主要包括 DC-DC 升压电源、驱动器、控制器、电机、丝杠传动装置，减少种绳的磨损、降低种子挤压，从而提高种绳铺机的工作质量和效率。覆土镇压装置采用 V 形镇压结构，降低对种绳滑移剪切力，避免种绳断裂。

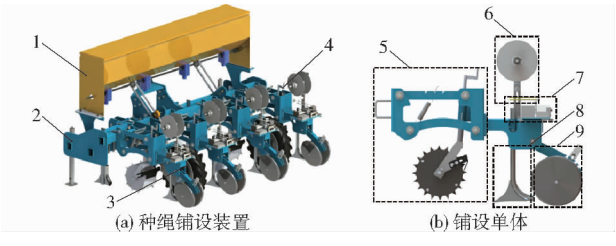


图 1 种绳铺设装置及铺设单体结构图

Fig. 1 Rope laying device and single structure for laying

1. 施肥系统 2. 机架 3. 地轮 4. 铺设单体 5. 四杆仿形机构 6. 导绳装置 7. 控制系统 8. 种绳开沟器 9. 覆土镇压装置

1.2 工作原理

种绳铺设机通过三点悬挂与拖拉机浮动连接，作业时液压系统处于浮动状态。通过调整地轮与仿形轮位置，保证机架水平并设定开沟深度，地轮通过链条传动将动力和运动传递给施肥系统，通过选择链条传动的链轮速比调整排肥量。开沟器在仿形机

构弹簧拉力、自重及土壤阻力作用下入土开沟。种绳经导绳装置引出后，由覆土镇压装置压入种沟。当种绳拉力超过阻尼阈值时，驱动导绳盘释放种绳，使其经导绳管精准落入沟底，随后覆土镇压。如图 2 所示，微动控制系统由拖拉机蓄电池供电，可根据前进速度自动调节放绳速度与方向，使种绳对中铺设，减少磨损。

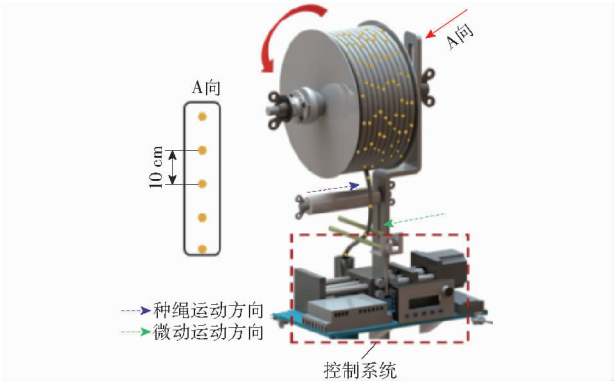


图 2　控制系统工作原理图

Fig. 2　Schematic of working principle of control system

2　关键装置设计

2.1　导绳装置设计

导绳装置主要由阻尼器和导绳辊组成，是种绳铺设机实现种绳稳定输送与保护种绳的核心功能模块。其中，导绳辊通过低摩擦导向结构确保种绳精准入沟，降低匀速放绳阻力，阻尼装置则通过阻力调节抑制导绳盘惯性转动，二者协同可有效解决种绳磨损、松脱及断裂等问题。

2.1.1　离心增力式负相关摩擦阻尼器设计

为解决种绳盘停车惯性问题，现有技术多采用固定阻尼器或主动控制装置。固定阻尼器虽结构简单，但阻尼力恒定，难以适配种绳盘停车过程的动态需求。主动控制装置虽能实现阻尼力动态调节，但需配套传感器、控制器等电子元件，不仅增加设备成本与复杂度，还易受农业潮湿环境、作业粉尘环境影响，可靠性不足，难以满足中小型种绳盘设备的低成本、高稳定性需求。

针对现有技术不足，本文设计了一种离心增力式负相关摩擦阻尼器。其通过连杆增力结构-弹簧-摩擦圆环的协同作用，在高速阶段提供较小阻尼力，以利于种绳顺利铺设并避免张力过载；在低速阶段增大阻尼力，有效抑制种绳盘空转与残余惯性。其纯机械结构无需额外电子元件，解决了传统阻尼器适配性差、可靠性低、成本高的问题，可有效防止停车惯性转动造成的种绳松脱、空转及断裂。

阻尼器整体结构如图 3 所示，阻尼器主要由外壳、内摩擦圆、轴承、转轴、叶片、连杆增力结构、离心滑块、弹簧和摩擦圆环组成。离心滑块通过销轴与连杆增力结构和叶片相连并沿叶片可径向移动，销轴作为连接件，将连杆增力结构各部分过盈配合，转轴通过轴承固定到外壳上。

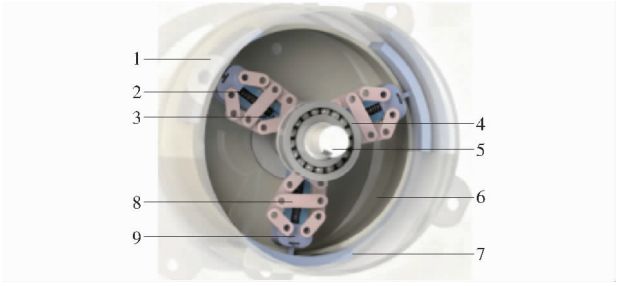


图 3　离心增力式负相关摩擦阻尼器三维图

Fig. 3　Three-dimensional view of centrifugal booster negative friction damper

1. 外壳　2. 弹簧　3. 叶片　4. 轴承　5. 转轴　6. 内摩擦圆　7. 摩擦圆环　8. 连杆增力结构　9. 离心滑块

2.1.2　阻尼力矩参数设计

在阻尼器设计中，阻尼力矩范围是设计的关键问题，最大阻尼力矩需要提供足够的张力，确保种绳在低速、启停阶段不会出现冗绳现象且不可过大导致种绳断裂；最小阻尼力矩需确保种绳在高速作业的情况下释放顺畅，维持其必要的微张力状态。

导绳盘的转动惯量直接影响阻尼力矩需求，当种绳盘缠满种绳时可以看作为空心圆柱体，则空心圆柱体的转动惯量可表示为

$$J = \frac{1}{2} m_1 (R^2 + r^2) \tag{1}$$

式中　J——转动惯量，kg·m^2

m_1——种绳盘质量，kg

R——种绳盘外半径，m

r_1——种绳盘内半径，m

阻尼需要满足种绳盘瞬间制动需求，所需力矩可表示为

$$M_d = J \frac{\omega}{t} \tag{2}$$

式中　M_d——阻尼力矩，N·m

ω——角速度，rad/s

t——时间，s

根据公式(1)、(2)可知阻尼力矩和种绳盘质量成正比，要得到最大阻尼力矩需测量种绳盘满载时的相关参数。根据前期试验研究，作业情况下种绳盘转速为 150 ~ 200 r/min，设计要求从该速度到静止时间为 1 s，由式(2)可知阻尼需要提供的力矩约为 0.8 N·m。

为确保种绳在高速释放过程中保持稳定、避免

松弛,阻尼器需提供一个基础的最小阻尼力矩,该力矩是维持种绳内部稳定的一个微张力,其主要抑制种绳的惯性动能变化。

在减速过程中,长度为 L 的种绳,其动能减少量 ΔE_k 为

$$\Delta E_k = \frac{1}{2}(V_{\max}^2 - V_{\min}^2)\rho L \tag{3}$$

式中 $V_{\max}$——种绳作业中最大速度,m/s

$V_{\min}$——种绳作业中最小速度,取 0 m/s

ρ——种绳线密度,kg/m

则微张力做的功 W 为

$$W = F_{\min} kL \tag{4}$$

式中 $F_{\min}$——阻尼提供的微张力,N

k——安全系数,取 0.1

根据能量平衡方程,最低力矩 $T_{\min}$ 计算公式为

$$T_{\min} = F_{\min} r_d = \frac{\rho V_{\max}^2 r_d}{2k} \tag{5}$$

式中 r_d——轴心到种绳受力点间的垂直距离,取平均值 0.07 m

通过上述理论推导与参数计算,本设计确定阻尼器所需提供的最低阻尼力矩为 0.11 N·m,该力矩能够在高速作业时提供稳定张力,有效抑制种绳的惯性松弛与形态失稳,确保释放过程的可靠性。

2.1.3 弹簧参数设计

弹簧作为阻尼器系统中的核心元件,其性能参数直接决定了阻尼力矩的输出特性。下面基于前述阻尼力矩要求,系统性地开展弹簧参数设计。

因与内摩擦圆摩擦是圆弧形状,所以需要对微元上的摩擦力矩进行力矩分析。在阻尼力矩最大时,摩擦圆环所受到的正压力只有弹簧拉力,此时线压力为

$$q = \frac{F_t}{L_a} \tag{6}$$

其中

$$L_a = r_2\theta \tag{7}$$

则有

$$q = \frac{F_t}{r_2\theta} \tag{8}$$

式中 q——摩擦圆环的线压力,N/m

L_a——接触弧长,m

F_t——总正压力,N

r_2——内摩擦圆半径,m

θ——摩擦圆环与内摩擦圆接触弧所对应的圆心角,(°)

对微元摩擦力矩分析,得

$$\begin{cases} \mathrm{d}L = r_2\mathrm{d}\theta \\ \mathrm{d}N = q\mathrm{d}L \\ \mathrm{d}F_f = \mu_1\mathrm{d}N \\ \mathrm{d}T = \mathrm{d}F_f r_2 \end{cases} \tag{9}$$

式中 $\mathrm{d}L$——接触弧上的微弧段长,m

$\mathrm{d}N$——微弧段上的正压力,N

$\mathrm{d}F_f$——微弧段上的摩擦力,N

$\mathrm{d}T$——摩擦力对轴心的力矩,N·m

μ_1——内摩擦圆与摩擦圆环的摩擦因数

对接触弧进行积分处理,得到其总正压力 T 表达式为

$$T = \int_0^\theta \mathrm{d}T = \int_0^\theta \mu_1 q r_2^2 \mathrm{d}\theta = \mu_1 F_t r_2 \tag{10}$$

根据 2.1.2 节可知系统所需的最大阻尼力矩为 0.8 N·m,代入可得总正压力为 32 N,阻尼器圆周设置了 3 个摩擦单体,所以单个正压力为 10.7 N,在最大阻尼力矩时,总正压力只由弹簧拉力提供,所以弹簧最小拉力为 10.7 N。

根据上述要求,系统所需最小阻尼力矩为 0.11 N·m,此时阻尼器旋转速度最大,弹簧最大拉力计算式为

$$T = 3\mu_1(bF_c - F_s)r_2 \tag{11}$$

其中

$$F_c = m_2\omega^2 r_3$$

式中 F_c——离心力,N

m_2——离心滑块质量,kg

r_3——离心半径,m

F_s——弹簧最大拉力,N

b——增力放大倍数

计算可得离心力为 8.77 N,则弹簧最大拉力为 20.5 N,综上所述弹簧的拉力范围应为 10.7 ~ 20.5 N。

2.2 开沟器设计

如图 1b 所示,开沟器由导绳管与滑尖焊接而成。作业时,滑尖在牵引作用下垂直入土,刺破土壤并使其产生挤压与轻微开裂。随后,导绳管引导两侧土壤流动分开,形成深度与宽度适宜的种沟,最后由导绳管引出的种绳完成铺设。

2.2.1 滑尖导曲线设计

滑尖导曲线设计是通过特定几何曲率降低作业阻力、提升入土性能并控制土壤扰动范围。导曲线主要包括直线型、圆弧型、抛物线型、指数曲线型。随着作业速度提高,开沟牵引阻力增长速率指数曲线最小[18],本文采用指数函数为滑尖导曲线。

设导曲线方程为

$$y = ax + c \tag{12}$$

式中 a——导曲线底数

c——常数项

由于常数项仅影响曲线位置变化,不会影响其形状,假设常数项为 0。建立直角坐标系构建指数函数导曲线模型,如图 4 所示,令点 m 为导曲线初始入土点,点 n 为导曲线终点离土点。

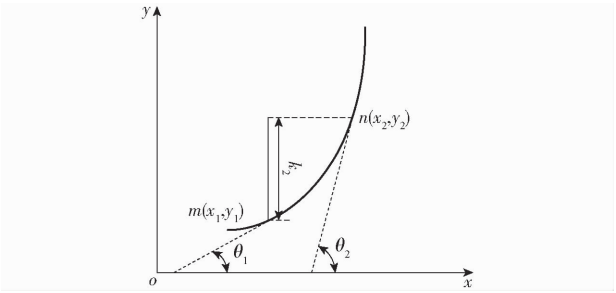


图 4　导曲线设计示意图

Fig. 4　Schematic of guide curve design

求入土点和离土点的斜率 y'_m、y'_n 可得

$$\begin{cases} y'_m = \tan\theta_1 = a^{x_1}\ln a \\ y'_n = \tan\theta_2 = a^{x_2}\ln a \end{cases} \tag{13}$$

式中　θ_1——导曲线入土角，(°)

θ_2——导曲线终止角，(°)

联立式(12)、(13)可得导曲线方程为

$$y = \mathrm{e}^{\frac{\tan\theta_2 - \tan\theta_1}{k_2}x} \tag{14}$$

式中　k_2——曲线垂直高度，mm

由式(14)可知，开沟器导曲线主要由入土角、导曲线终止角以及曲线垂直高度决定。根据种绳铺设机械和大豆种植农艺的要求，取曲线垂直高度为 100 mm。

2.2.2　入土角参数确定

入土角合理设计有助于滑尖顺畅入土、降低阻力、提高作业效率。选取导曲线上任意一点 m 进行受力分析，如图 5 所示。

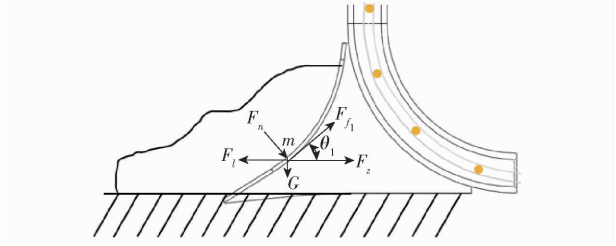


图 5　导曲线上点 m 受力图

Fig. 5　Force diagram of point m on derivative curve

建立水平和垂直方向力学平衡方程

$$\begin{cases} F_l - F_n\sin\theta_1 = F_z + F_{f1}\cos\theta_1 \\ F_{f1}\sin\theta_1 = G + F_n\cos\theta_1 \\ F_{f1} = \mu_2 F_n \end{cases} \tag{15}$$

式中　F_l——机器对开沟器的拉力，N

F_n——土壤对开沟器的法向力，N

F_z——土壤对开沟器的切向阻力，N

F_{f1}——土壤对开沟器的摩擦力，N

G——土壤重力，N

μ_2——土壤与开沟器的摩擦因数

整理式(15)可得

$$F_z = F_l - \frac{G}{\arctan\theta_1 - \mu_2} - F_{f1}\cos\theta_1 \tag{16}$$

由式(16)可知，开沟器受到的牵引阻力与机器对开沟器拉力、入土角等有关，本文设计的开沟器为锐角开沟器，入土角小于 90°，F_z 关于入土角 θ_1 在 0 ~ π/2 上单调递增，即入土角 θ_1 越大，开沟器受到的阻力就会越大，但过小的入土角不利于播种，由于开沟器导曲线设计为指数型，其上任意一点的切线斜率都不相同，即入土角在不断变化，参考文献[19 - 20]，确定开沟器入土角应大于 25°且小于 50°，后续会采用仿真方法对其参数完成优化。

2.2.3　导绳管设计

导绳管是开沟器铲柄，同时具有引导种绳进入种沟和开沟的功能。

土壤扰动量是评价开沟器工作质量重要参数，过大不仅会增加能量消耗，同时会破坏土壤原有的结构，影响土壤的透气性和保水性，从而影响种带内种子发芽和生长。从开沟器结构设计可知，导绳管外径是决定土壤扰动量的关键结构参数，在满足种绳铺放质量条件下，为获得尽可能小的土壤扰动量需要减小导绳管外径尺寸，所以在保证导绳管有足够的抗弯强度条件下获得最小导绳管外径尺寸。根据弯曲强度公式可知

$$\sigma = \frac{KM}{W_d} \tag{17}$$

其中

$$W_d = \frac{I}{y_{\max}} \tag{18}$$

式中　σ——材料弯曲时的正应力，Pa

K——安全系数

M——材料所受到的弯矩，N·m

W_d——断面模量，m^3

I——横截面对中性轴的惯性矩，$\mathrm{kg\cdot m}^4$

$y_{\max}$——横截面上最大的距离，m

对于截面为外径 D、内径 d 的空心圆，其惯性矩和断面模量为

$$\begin{cases} I = \dfrac{\pi D^4}{64}(1 - a_0^4) \\ W_d = \dfrac{\pi D^3}{32}(1 - a_0^4) \end{cases} \tag{19}$$

其中

$$a_0 = \frac{d}{D} \tag{20}$$

综上弯曲强度计算式为

$$\sigma = \frac{KM}{\dfrac{\pi D^3}{32}(1 - a_0^4)} \tag{21}$$

为了保证导绳管有足够的抗弯强度，其弯曲强度应满足

$$\sigma \leqslant [\sigma] \tag{22}$$

式中 $[\sigma]$——材料的许用应力

根据式(21)可知,导绳管的弯曲强度与弯管内外径有直接关系,开沟器是为了运输种绳,所以内径几乎不变,定为 22 mm,为了满足强度条件,需选择较大的导绳管外径,而本文需要尽可能减小土壤扰动量,综合上述因素,导绳管外径初定为 26 ~ 34 mm,后续用离散元法对此参数进行分析优化。

3 离散元仿真试验

3.1 仿真平台构建

仿真试验中土壤颗粒采用直径为 5 mm 球体表示,虚拟土槽尺寸为 1 000 mm × 400 mm × 100 mm,土壤颗粒通过自重沉积并在土壤层表面加载生成实测土壤密度所需垂直载荷。土壤颗粒与开沟器之间设定为 Hertz - Mindlin(no slip)接触模型,土壤间添加 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型,土壤接触参数为:颗粒黏结半径为 5 mm,黏结法向刚度为 1×10^9 N/m,黏结切向刚度为 5×10^8 N/m,黏结法向临界应力为 2.5×10^4 Pa,黏结切向临界应力为 2.5×10^4 Pa。将 Solidworks 中绘制的种绳开沟器三维模型导入到 EDEM 中,将开沟器的材质设置为 65Mn,如图 6 所示。参考文献[21 - 22],确定土壤密度为 2 650 kg/m^3,,剪切模量为 1.0×10^6 Pa,泊松比为 0.34,土壤与土壤间的滚动摩擦因数、静摩擦因数、碰撞恢复系数分别为 0.2、0.3、0.6,65Mn 钢的密度为 7 865 kg/m^3,剪切模量为 7.9×10^{10} Pa,泊松比为 0.3,65Mn 钢与土壤间的滚动摩擦因数、静摩擦因数、碰撞恢复系数分别为 0.22、0.48、0.42。

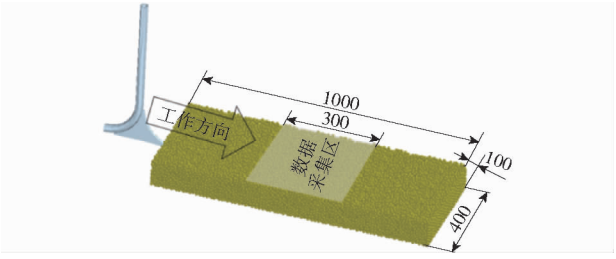


图 6 开沟器和土壤 EDEM 模型

Fig. 6 Furrow opener and soil EDEM model

3.2 试验方案

采用三因素五水平二次正交旋转中心组合试验方法,以导绳管外径、入土角、播深为试验因素,工作阻力和土壤扰动系数为性能评价指标,据上述分析确定试验因素取值范围:导绳管外径为 26 ~ 34 mm、入土角为 28° ~ 36°、播深为 30 ~ 60 mm,因素水平编码如表 1 所示,每个试验处理重复 3 次,取平均值为最终试验结果。

表 1 试验因素编码

Tab. 1 Test factors and coding

编码	因素		
	导绳管外径 X_1/mm	入土角 X_2/(°)	播深 X_3/mm
1.682	34.00	36.00	60.00
1	32.38	34.38	53.92
0	30.00	32.00	45.00
-1	27.62	29.62	36.08
-1.682	26.00	28.00	30.00

3.3 评价指标测量

(1)工作阻力

在 EDEM 软件后处理 Create Gragh 模块导出并整合数据,获得工作阻力。

(2)土壤扰动系数

在相同播种量的情况下,种沟土壤扰动过大,会导致土壤中的养分分布不均,影响大豆的生长和产量。种沟土壤扰动测量时,在开沟器经过土槽后,使用 EDEM 软件后处理功能中的 Clipping 功能,在数据采集区等间距截取垂直于开沟器前进方向的 5 个截面,截取厚度为 10 mm,提取各截面内土壤颗粒的空间坐标数据,并基于 Origin 2024 软件平台构建二维散点图以实现沟槽表面形貌的可视化重构。考虑到离散元模型中土壤颗粒半径设定为 5 mm,而导出坐标对应颗粒质心位置,为准确表征实际地表轮廓,对获取的表面颗粒数据进行几何校正:将每个表面颗粒的质心坐标沿垂直方向提升 5 mm,以此消除颗粒几何特征对地表形貌重构的影响。该校正方法有效避免了因颗粒质心与表面位置偏差导致的轮廓表征误差,显著提高了沟槽剖面重建精度[23]。然后用 Image J 软件对截面散点图进行处理,可以直接得出所求区域面积。如图 7 所示,用 Image J 直接得出 A_s 的面积。并对 5 个沟形截面进行土壤扰动系数 λ 计算,计算式为[24]

$$\lambda = \frac{A_s}{A_q} \times 100\% \tag{23}$$

其中

$$A_q = WH \tag{24}$$

式中 A_q——开沟前地表至理论开沟沟底的土壤扰动面积,mm^2

A_s——开沟后地表至实际开沟沟底的土壤扰动面积,mm^2

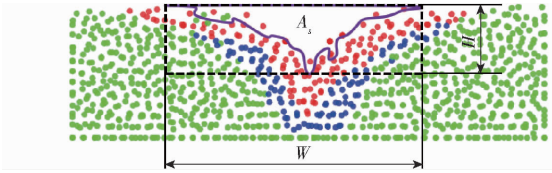


图 7 土壤扰动轮廓横断示意图

Fig. 7 Schematic of soil disturbance profile cross-section

H——理论开沟深度，mm

W——开沟后的土壤沟型轮廓宽度，mm

3.4　结果与分析

本次仿真试验共需 23 组处理，其中中心点组合试验重复 9 次，结果如表 2 所示，表中 x_1、x_2、x_3 为因素编码值。

表 2　试验方案和结果

Tab. 2　Test scheme and results

序号	因素			F/N	λ/%
	x_1	x_2	x_3		
1	-1	-1	-1	365.2	20.89
2	1	-1	-1	360.1	28.36
3	-1	1	-1	359.0	23.32
4	1	1	-1	373.6	30.93
5	-1	-1	1	356.5	25.16
6	1	-1	1	371.6	33.87
7	-1	1	1	368.3	24.87
8	1	1	1	385.2	30.81
9	-1.682	0	0	360.8	24.52
10	1.682	0	0	381.7	40.31
11	0	-1.682	0	364.5	25.31
12	0	1.682	0	369.2	24.08
13	0	0	-1.682	365.7	20.80
14	0	0	1.682	370.2	25.51
15	0	0	0	360.1	23.44
16	0	0	0	356.8	22.12
17	0	0	0	353.6	23.10
18	0	0	0	354.6	23.12
19	0	0	0	357.6	22.11
20	0	0	0	356.8	23.12
21	0	0	0	353.8	23.54
22	0	0	0	357.6	21.54
23	0	0	0	353.6	23.67

不同的参数组合条件下土壤颗粒在种绳开沟器的作用下均表现出相似的运动状态，颗粒运动轨迹和速度云图如图 8（图中分图题为各试验参数数值）所示，颗粒主要由种绳开沟器推进，颗粒先向上推起后向种沟双侧分散坍落形成种沟。由图 8a、8b 可以发现，随着播深的增加，种沟土壤扰动系数增加，但由于铲尖较薄，所以扰动不是很明显。导绳管外径对种沟土壤扰动系数较大，由图 8a、8c 可以发现，随着导绳管外径的增加，种沟土壤扰动系数明显变大。

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行方差分析，如表 3 所示，两个指标的回归模型均极显著（$P<0.01$），拟合效果较好。播深对作业阻力具有显著影响，导绳管外径、入土角对作业阻力具有极显著影响，影响由大到小依次为导绳管外径、入土角、播深，导绳管外径与入土角之间的交互作用对作业阻力有显著影响，导绳管外径与播深之间的交互作用对作业阻力有显著影响；导绳管外径、播深对种沟土壤扰动系数具有极显著影响，影响由大到小依次为导绳管外径、播深、入土角，入土角和播深之间的交互作用对种沟土壤扰动系数有极显著影响。

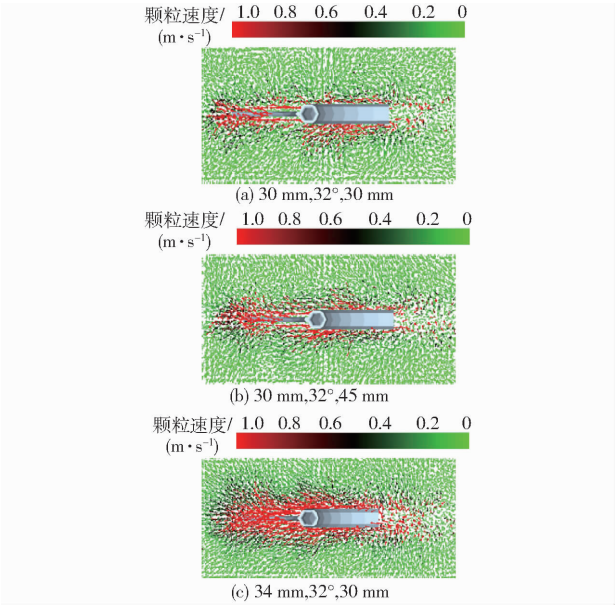


图 8　仿真土壤颗粒运动轨迹与速度云图

Fig. 8　Simulation of trajectory and velocity of soil particles

3.5　响应曲面分析

导绳管外径和入土角对工作阻力的影响规律如图 9a 所示，当入土角一定时，工作阻力随导绳管外径增大而增大，主要是由于随着导绳管外径增大，其与土壤接触面积也增大，土壤对于导绳管的反作用力也会增大，工作阻力随之增大。当导绳管外径一定时，工作阻力随入土角增大而增大，但工作阻力总体变化不明显，这主要是由于种绳开沟器的铲尖宽度为 8 mm，相对于导绳管外径较小，主要受力区域在后方，在所设定的试验范围内，对作业阻力的影响更小。导绳管外径和播深对工作阻力的影响规律如图 9b 所示，当播深一定时，工作阻力随导绳管外径增大而增大；当导绳管外径一定时，工作阻力随播深增大而增大，但总体变化不明显，这是由于本设计主要应用于旋耕后的试验田地，土壤比较疏松且播深要求较浅，所以对工作阻力的影响较小。入土角和播深对种沟土壤扰动系数的影响规律如图 9c 所示，当入土角一定时，种沟土壤扰动系数随播深的增大而增大；当播深一定时，种沟土壤扰动系数随入土角变化基本不变。

3.6　参数优化

在导绳管外径 26～34 mm、入土角 28°～36°、播深 30～60 mm 的约束条件下，以工作阻力和种沟土壤扰动系数最小为目标进行优化。目标函数和约束条件表示为

表 3 方差分析

Tab. 3 Analysis of variance

变异来源	作业阻力					种沟土壤扰动系数				
	自由度	方差和	均方差	F	P	自由度	方差和	均方差	F	P
模型	9	1575.73	175.08	17.41	<0.000 1 **	9	463.75	51.53	66.50	<0.000 1 **
x_1	1	430.20	430.20	42.79	<0.000 1 **	1	231.98	231.98	299.39	<0.000 1 **
x_2	1	120.72	120.72	12.01	<0.004 2 **	1	0.013	0.013	0.017	0.899 6
x_3	1	71.59	71.59	7.12	0.019 3 *	1	26.80	26.80	34.59	<0.000 1 **
x_1x_2	1	57.78	57.78	5.75	0.032 2 *	1	0.86	0.86	1.12	0.310 0
x_1x_3	1	63.28	63.28	6.29	0.026 2 *	1	0.023	0.023	0.030	0.865 5
x_2x_3	1	40.95	40.95	4.07	0.064 7	1	8.72	8.72	11.25	0.005 2 **
x_1^2	1	390.10	390.1	38.80	<0.000 1 **	1	187.65	187.65	242.18	<0.000 1 **
x_2^2	1	183.60	183.60	18.26	0.000 9 **	1	7.94	7.94	10.25	0.006 9 **
x_3^2	1	228.01	228.01	22.68	0.000 4 **	1	0.42	0.42	0.54	0.474 5
残差	13	130.71	10.05			13	10.07	0.77		
失拟	5	89.20	17.84	3.44	0.059 2	5	5.57	1.11	1.98	0.186 1
误差	8	41.50	5.19			8	4.50	0.56		
总和	22	1 706.44				22	473.8			

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

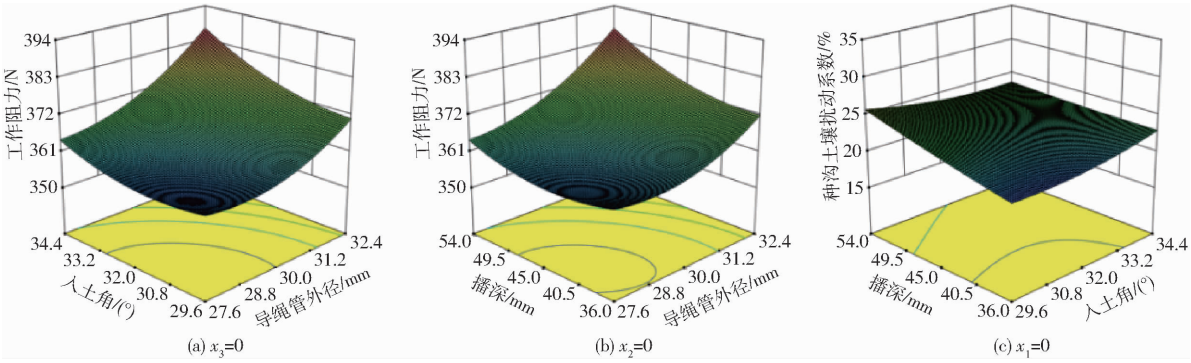


图 9 因素交互作用响应曲面

Fig. 9 Interaction significant response surface plots

$$\begin{cases} \min F(X_1, X_2, X_3) \\ \min \lambda(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 26\ \text{mm} \leqslant X_1 \leqslant 34\ \text{mm} \\ 28° \leqslant X_2 \leqslant 36° \\ 30\ \text{mm} \leqslant X_3 \leqslant 60\ \text{mm} \end{cases} \end{cases} \tag{25}$$

运用 Design-Expert 8.0.6 软件中 Optimization 模块进行优化。考虑到导绳管外径对工作阻力和种沟土壤扰动系数影响显著，所以在播深为 45 mm 的条件下进行优化处理，优化结果如图 10 所示。图中黄色区域为最佳工作区域，当导绳管外径为 24.5 ~ 32.0 mm、入土角 25.2° ~ 37.1°时，工作阻力小于 375 N，种沟土壤扰动系数小于 30%，优化结果满足大豆播种相关农艺要求。

在兼顾工作阻力与土壤扰动系数的原则下，从优化解集中选取最佳参数组合，经水平值与实际值编码转换得到最佳组合：播深 45 mm、入土角 32°、导绳管外径 30 mm，此时工作阻力为 360.1 N，土壤扰动系数为 23.4%。

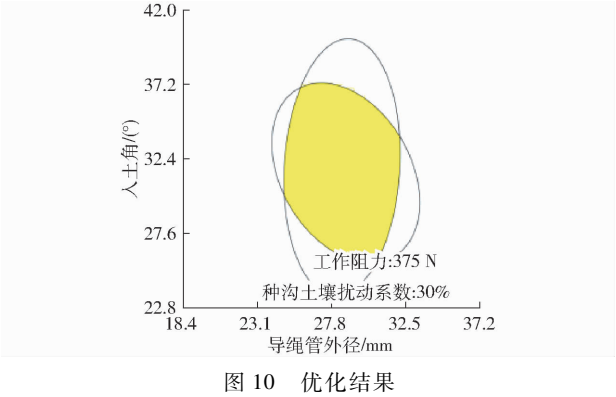


图 10 优化结果

Fig. 10 Optimized results

4 田间试验

根据参数组合优化结果完成样机加工、装配以及调试后进行田间试验，如图 11 所示。

试验主要仪器与装置如图 11 所示，包括 1204 型拖拉机（潍柴雷沃智慧农业有限公司）、种绳铺设机、JM5937A 型实时数据采集装置、SFZ001 型拉力



(a) 机器设备连接　　(b) 评价指标测量

图 11　机器设备连接及评价指标测量

Fig. 11　Machine equipment connection and indicator measurement

1. 拖拉机　2. 种绳铺设机　3. 阻尼装置　4. 微动控制系统

测量传感器、JM3823 型适调器、沟型测绘装置、WET150 型土壤湿度计(Delta－T Devices 公司)、数码摄像机、皮尺(量程:30 m,精度:1 cm)、卷尺(量程:5 m,精度:1 mm)等。

4.1　评价指标测定方法

工作阻力采用田间机械动力学参数遥测仪进行测量和采集。在测量区域提取工作阻力数据,取平均值作为最终试验结果。

使用沟型测绘装置时,先将架体中心对准种沟并调平。将长 500 mm 的木棒依次插入间距 5 mm 的定位孔,触土后测量木棒顶端与架体上表面的距离,记录数据。通过 Origin 2024 拟合沟型断面,导入 Image J 处理图像,并利用式(23)计算土壤扰动系数。沿种沟每 5 m 测量一次,每组试验重复 3 次,最终结果取 5 组数据的平均值。

种绳在作业过程中的松脱与断裂情况均通过人工方法进行观测记录:松脱长度于机器停车且种绳盘停止惯性转动后直接测量,重复 5 次试验取其平均值作为最终结果;断裂情况则由一名观察员沿作业方向同步跟随机组,使用数码摄像机全程记录种绳状态,一旦发生断裂立即标记位置并拍摄断裂点特写图像,以供后续分析。

4.2　验证试验

为验证离散元仿真结果的正确性,对仿真试验优化的最优参数组合装置进行田间试验,即加工导绳管外径 30 mm、入土角 32°的种绳开沟器安装在种绳铺设机上,由种绳铺设机架上的三点悬挂与拖拉机相连,在播深 45 mm 的条件下进行测试。验证结果表明,工作阻力小于 369 N,种沟土壤扰动系数小于 29%,工作阻力、种沟土壤扰动系数测量结果与仿真试验基本一致。由于仿真试验所构建的土壤模型相对理想,无法准确模拟出复杂的田间环境,所以田间试验工作阻力略高于仿真试验结果,但误差均在允许范围内,田间试验验证结果表明联合仿真优化结果可信。

4.3　对比试验

在播深 45 mm 条件下,对比了加装与未加装阻尼装置的种绳铺设机的作业性能,如图 12 所示(黄框标识增设阻尼装置的机组,红框标识未增设的机组)。试验结果如表 4 所示,增设阻尼装置后,种绳松脱长度显著减小,说明该装置有效抑制了种绳盘的惯性转动,同时,未发生种绳断裂;而未增设阻尼装置的机组出现 2 次断裂,证明阻尼装置能够缓解张力突变与惯性冲击。



图 12　田间对比试验

Fig. 12　Field comparison test

表 4　对比试验结果

Tab. 4　Comparison of experimental results

类型	松脱长度/mm	种绳断裂情况
增设阻尼装置	18	无
	15	无
	26	无
	21	无
	23	无
未增设阻尼装置	86	无
	93	有
	78	无
	82	无
	96	有

5　结论

(1)针对适应大豆育种机械化种植,设计了一种适配大豆育种种绳铺设机的导绳-开沟系统,为大豆种绳化育种提供了技术支持。

(2)为解决种绳盘停车惯性转动问题和满足阻尼力矩需与速度相关的需求,设计了一种新型的离心增力式负相关摩擦阻尼器,确定了阻尼需提供的力矩范围,对弹簧进行选型分析,得到理论力矩-转速图。

(3)确定了影响种绳开沟器工作阻力和种沟土壤扰动系数的主要因素,各因素对工作阻力影响显著性由大到小依次为导绳管外径、入土角、播深,导绳管外径与入土角之间的交互作用对工作阻力有显著影响,导绳管外径与播深之间的交互作用对工作阻力有显著影响;各因素对种沟土壤扰动系数影响

显著性由大到小依次为导绳管外径、播深、入土角，入土角和播深之间的交互作用对种沟土壤扰动系数有极显著影响。优化参数组合为：导绳管外径 30 mm、入土角 32°、播深 45 mm。

(4)田间试验表明，优化后的种绳开沟器在播深 45 mm 的条件下具有良好的开沟效果，工作阻力均小于 369 N，种沟土壤扰动系数均小于 29%。增设阻尼装置的种绳铺设机能较好地抑制种绳盘惯性转动的问题，种绳松脱长度均小于 26 mm 且无种绳断裂现象。

参 考 文 献

[1] 李鹤，纪文义，史乃煜，等. 大豆辊式镇压器土壤压实随深度的规律分析[J]. 大豆科学，2025，44(2)：117－128.
LI He, JI Wenyi, SHI Naiyu, et al. Analysis on the response law of soil compaction effected with depth based on roller compacting device[J]. Soybean Science, 2025, 44(2): 117－128. (in Chinese)

[2] GAO Y, SHI S, XU M, et al. Current research on soybean pest management in China[J]. Oil Crop Science, 2018, 3(4): 215－227.

[3] GUO Shibo, ZHANG Zhentao, GUO Erjing, et al. Historical and projected impacts of climate change and technology on soybean seed yield in China[J]. Agricultural Systems, 2022, 203: 103522.

[4] 陈海涛，王洪飞，王业成，等. 三叶式自动清换种大豆育种气吸排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(12)：75－85.
CHEN Haitao, WANG Hongfei, WANG Yecheng, et al. Design and experiment of three-leaf type air-suction seed meter with automatic clear and replace seeds features for soybean plot test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 75－85. (in Chinese)

[5] 顿国强，毛宁，刘文辉，等. 四杆平移式大豆小区育种排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(4)：70－78.
DUN Guoqiang, MAO Ning, LIU Wenhui, et al. Design and experiment of four-bar translational seed metering device for soybean plot breeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 70－78. (in Chinese)

[6] 尚书旗，吴秀丰，杨然兵，等. 小区育种播种装备与技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报，2021，52(2)：1－20.
SHANG Shuqi, WU Xiufeng, YANG Ranbing, et al. Research status and prospect of plot-sowing equipment and technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 1－20. (in Chinese)

[7] 刘春磊，梅松，童一飞. 种绳高质量编织机设计与试验[J]. 中国农机化学报，2023，44(10)：37－44.
LIU Chunlei, MEI Song, TONG Yifei. Design and test of high quality knitting machine for seed rope[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(10): 37－44. (in Chinese)

[8] 张伟辰. 一阶气送式水稻直播排种系统的设计与试验[D]. 武汉：华中农业大学，2024.
ZHANG Weichen. Design and testing of a first-order air-fed rice direct seeding system and discharging system[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024. (in Chinese)

[9] 黄小毛，朱恒，张顺，等. 基于振动盘供种的混编景观种子带编织机设计[J]. 农业工程学报，2022，38(7)：10－19.
HUANG Xiaomao, ZHU Heng, ZHANG Shun, et al. Design of a mixed seed tape knitting machine based on the vibrating disk for seed feeding[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(7): 10－19. (in Chinese)

[10] 黄小毛，兰朝伟，马丽娜，等. 油麦混编景观种子带编织机研制[J]. 农业工程学报，2021，37(3)：9－18.
HUANG Xiaomao, LAN Chaowei, MA Lina, et al. Development of landscape seed tape mixed weaving machine for rape and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(3): 9－18. (in Chinese)

[11] 杨杨. 可降解种子带编织工艺及装置结构设计与试验[D]. 阿拉尔：塔里木大学，2024.
YANG Yang. Design and experiment of biodegradable seed ribbon weaving process and device structure[D]. Alar: Tarim University, 2024. (in Chinese)

[12] 张亚双. 水稻种绳直播机研制与试验研究[D]. 沈阳：沈阳农业大学，2006.
ZHANG Yashuang. Study on development principle and testing of seed rope direct sowing machine of rice[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2006. (in Chinese)

[13] 任文涛，吕小荣，张本华. 水稻种绳直播机对地表不平度的动态响应[J]. 农业机械学报，2009，40(8)：58－61.
REN Wentao, LÜ Xiaorong, ZHANG Benhua. Dynamic response of taped type rice direct seeding machine for field surface roughnes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 58－61. (in Chinese)

[14] 韩双，任文涛，刘翠红. 手扶式水稻种绳直播机设计与试验研究[J]. 农机化研究，2019，41(3)：144－148，164.
HAN Shuang, REN Wentao, LIU Cuihong. Design and experimental analysis of walking rice rope direct seeding machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(3): 144－148, 164. (in Chinese)

[15] 张宝峰. 小型水稻种绳直播机设计及其试验研究[D]. 沈阳：沈阳农业大学，2018.
ZHANG Baofeng. Design and experimental study of a small roped type rice direct seeding machine[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[16] DEPPERMANN K L, FORINASH B J, FREY T, et al. Planting seed tape planter: 201301528360[P]. 2013－06－20.

[17] LV Xiaolian, LV Xiaorong, MA Rongchao. Design of a rice rope laying machine for direct sowing[J]. Engineering Transactions, 2017, 65(3): 447－460.

[18] 刘瑞,李衍军,刘春晓,等.铲式宽苗带燕麦播种开沟器设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(9):89-96.
LIU Rui, LI Yanjun, LIU Chunxiao, et al. Design and experiment of shovel type wide seedling belt oat seeding furrow opener [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(9):89-96. (in Chinese)

[19] 苟文,马荣朝,杨文钰,等.小麦免耕播种机开沟器的设计[J].农业工程学报,2012,28(增刊1):21-25.
GOU Wen, MA Rongchao, YANG Wenyu, et al. Design of opener on no-till wheat seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(Supp.1):21-25. (in Chinese)

[20] 张杰,赵春花.小型山地苜蓿播种机开沟器的设计与试验[J].农业机械,2013(10):149-152.
ZHANG Jie, ZHAO Chunhua. Design and experiment of furrow opener for small mountain alfalfa seeder[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2013(10): 149-152. (in Chinese)

[21] 侯守印,纪张驰,薛东辉,等.适配免耕播种单体的清秸装置改进设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(7):111-122.
HOU Shouyin, JI Zhangchi, XUE Donghui, et al. Improved design and test of straw cleaning device suitable for no-tillage seeding unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(7):111-122. (in Chinese)

[22] 李运通,郑娟,张百祥,等.圆盘滑刀式小粒径蔬菜窄行密植播种机设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(1):197-209.
LI Yuntong, ZHENG Juan, ZHANG Baixiang, et al. Design and testing of disc-sliding knife narrow-row precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(1):197-209. (in Chinese)

[23] AIKINS K A, JENSEN T A, ANTILLE D L, et al. Evaluation of bentleg and straight narrow point openers in cohesive soil [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 211: 105004.

[24] 王昭宇,尤泳,贺长彬,等.退化羊草地切根释压松土工艺研究与试验[J].农业机械学报,2024,55(12):404-417.
WANG Zhaoyu, YOU Yong, HE Changbin, et al. Research and experiment on loosening soil by cutting roots to release pressure for degraded leymus chinensis grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024, 55(12):404-417. (in Chinese)

(上接第 183 页)

[31] 张铙,孙宇,林清河,等. 基于自适应阈值 Canny 边缘检测的 Shi-Tomasi 角点检测方法[J].东北大学学报(自然科学版),2025,46(10):36-43.
ZHANG Yao, SUN Yu, LIN Qinghe, et al. Shi-Tomasi corner detection method based on adaptive threshold Canny edge detection[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2025,46(10):36-43. (in Chinese)

[32] 郑权, 乔江伟, 李婕, 等.融合多尺度特征和注意力机制的油菜倒伏分类[J].农业工程学报,2024,40(11):186-194.
ZHENG Quan, QIAO Jiangwei, LI Jie, et al. Integration of multiscale characterization and attention mechanisms for oilseed rapelodging classification methodology[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(11):186-194. (in Chinese)

[33] 罗钧, 刘建强, 庞亚男.基于邻域搜索 JADE 的二维 Otsu 多阈值图像分割[J].系统工程与电子技术,2020,42(10):2164-2171.
LUO Jun, LIU Jianqiang, PANG Yanan. Muiti-threshold image segmentation of 2D Otsu based on neighborhood search JADE [J]. System Engineering and Electronics,2020,42(10):2164-2171. (in Chinese)

[34] 孙俊, 宋佳, 武小红, 等.基于改进 Otsu 算法的生菜叶片图像分割方法[J].江苏大学学报(自然科学版),2018, 39(2):179-184.
SUN Jun, SONG Jia, WU Xiaohong, et al. Image segmentation method of lettuce leaf based on improved Otsu algorithm[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition),2018,39(2):179-184. (in Chinese)