

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.11.010

# 仿生半圆弧齿顶水田除草刀设计与试验

肖茂华<sup>1</sup> 段卫卫<sup>1</sup> 郑和<sup>1</sup> 李紫琪<sup>1</sup> 朱烨均<sup>1</sup> 单以才<sup>2</sup>

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 南京晓庄学院电子工程学院, 南京 211171)

**摘要:** 水稻是我国的主要粮食作物, 杂草严重影响水稻的生长与产量。针对现有水田除草刀入土冲击大、结构稳定性不足等问题, 本文围绕除草刀关键部件开展结构设计与参数优化研究。基于犬齿结构仿生原理, 构建一种半圆弧齿顶结构除草刀模型, 系统分析其结构组成与工作原理, 并结合水稻栽培行距及根系分布特征, 完成关键结构参数设计。通过建立除草刀运动学模型, 确定刀轴转速与前进速度的匹配关系, 实现结构参数与作业性能的协同设计。此外, 采用离散元软件 EDEM 构建除草刀-土壤耦合仿真模型, 以入土深度、转速与前进速度为试验因素, 以除草扭矩和土壤扰动速度为试验指标, 以降低功耗为目标进行了三因素三水平正交试验, 以考察试验因素对除草刀作业性能的影响规律。结果表明: 刀轴转速为主要影响因素, 其次为入土深度, 前进速度影响较小。综合多指标评分结果表明, 入土深度 50 mm、转速 180 r/min 和前进速度 0.7 m/s 的工况参数组合为最优工况, 能在增大作业区域内土壤扰动的同时, 减少机械负载。同时, 提取不同推进距离下的扰动断面轮廓进行几何对比, 验证了仿生齿形结构对土壤扰动行为的优化作用, 证明其具有较优的作业性能。

**关键词:** 水田除草刀; 半圆弧齿顶; 土壤扰动; 工况参数优化; 多指标综合评分

**中图分类号:** S222.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2026)11-0109-13

**OSID:**



## Design and Experiment of Bionic Semi-circular Arc Tooth Top Paddy Field Weeding Knife

XIAO Maohua<sup>1</sup> DUAN Weiwei<sup>1</sup> ZHENG He<sup>1</sup> LI Ziqi<sup>1</sup> ZHU Yejun<sup>1</sup> SHAN Yicai<sup>2</sup>

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. School of Electronic Engineering, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China)

**Abstract:** Rice is the main food crop in China, and weeds seriously affect the growth and yield of rice. Aiming at the problems of large impact and insufficient structural stability of the existing paddy field weeding knife, focusing on the structural design and parameter optimization of the key components of the weeding knife, based on the bionic principle of canine tooth structure, a weeding knife model with semi-circular tooth top structure was constructed, and its structural composition and working principle were systematically analyzed. Combined with the row spacing and root distribution characteristics of rice cultivation, the key structural parameters were designed. By establishing the kinematics model of the weeding knife, the matching relationship between the rotation speed of the cutter shaft and the forward speed was determined, and the collaborative design of the structural parameters and the working performance was realized. In addition, the discrete element software EDEM was used to construct the weeding knife-soil coupling simulation model. The three-factor and three-level orthogonal test was carried out to investigate the influence of test factors on the performance of the weeding knife by taking the soil depth, rotation speed and forward speed as the test factors, the weeding torque and soil disturbance speed as the test indexes, and the power consumption as the goal. The results showed that the rotation speed of the cutter shaft was the main influencing factor, followed by the depth of penetration, and the influence of the forward speed was relatively small. The results of comprehensive multi-index scoring showed that the combination of working parameters with soil depth of 50 mm, rotation speed of 180 r/min and forward speed of 0.7 m/s was the optimal working condition, which can increase the soil disturbance in the

收稿日期: 2025-12-23    修回日期: 2025-12-31

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2022YFD2001204)、国家自然科学基金项目(32572220)和江苏省农机研发制造推广应用一体化试点项目(JSYTH2025-05)

**作者简介:** 肖茂华(1981—), 男, 教授, 博士, 主要从事智能农机装备研究, E-mail: xiaomaohua@njau.edu.cn

working area and reduce the mechanical load. At the same time, the contour of the disturbed section under different propulsion distances was extracted for geometric comparison, which verified the optimization effect of the bionic tooth structure on the soil disturbance behavior and proved that it had better operation performance.

**Key words:** paddy field weeding knife; semi-circular arc tooth top; soil disturbance; optimization of working condition parameters; multi-indicator comprehensive scoring

# 0 引言

水稻是东亚地区的主要粮食作物,稻田杂草通过争夺阳光、养分以及生长空间等,严重影响水稻正常生长<sup>[1]</sup>。据研究数据显示,杂草危害可导致水稻年均产量损失率达 15%<sup>[2]</sup>。目前水田除草主要采用人工除草、化学除草和机械除草 3 种方式<sup>[3-4]</sup>。其中人工除草成本高且费时费力,化学除草剂的长期大量使用引发土壤污染和生态失衡等问题<sup>[5-6]</sup>。相比之下,机械除草<sup>[7]</sup>不仅兼具作业效率高、环境友好等优势,而且还具有增强土壤透气性、促进有机质分解、改善土壤微生态等优势。相关研究表明<sup>[8]</sup>,机械除草可使土壤氧含量提升,氮磷钾有效成分转化率提高,从而为水稻根系发育创造有利条件。因此,机械式水田除草装备作为一种高效率、无化学污染、环境友好型的农业机械,被列入中国农业机械化发展的重点推广技术。

机械除草主要通过旋转切割、抛切分离、拉拔清除及埋压隔离等力学方式实现杂草清除。其核心机制是机械部件施加剪切应力,当力超过杂草组织强度阈值时切断杂草根系。同时,切断的杂草残体被埋入 3~5 cm 泥水层以下,利用厌氧环境抑制二次萌发。目前,国内外研发了多款机型的水田除草机,如日本和同产业 MSJ-4 型步进式水稻田间除草机<sup>[9]</sup>、日本久保田 SJ-6(8)N 系列的高精度水田除草机<sup>[10]</sup>、农业农村部南京农业机械化研究所研制的 2BYS-6 型水田中耕除草机<sup>[11]</sup>、东北农业大学王金武团队研制的 3ZS-150 型水稻中耕除草机<sup>[12]</sup>以及华南农业大学研制的步进式水田中耕除草机<sup>[13]</sup>等,其大多采用除草辊、除草耙齿或者旋转式耕耘锄进行除草。尽管上述除草装置在不同工况下取得了一定应用效果,但其除草装置多采用锐角齿顶或锯齿形结构,在高含水率水田环境中作业时易产生较大的瞬时冲击载荷与扭矩波动,导致结构磨损加剧、能耗增加及作业稳定性下降<sup>[14-15]</sup>。此外,强扰动还可能引起土体过度抛散或秧苗根系压埋问题。

因此,本文针对水田高含水率作业环境下传统锐角齿顶除草装置冲击载荷大、结构磨损严重及作

业稳定性不足等问题,根据犬齿结构仿生设计一种半圆弧齿顶结构除草刀。结合水稻行距与根系分布特征完成关键结构参数设计,构建除草刀-土壤离散元耦合模型,系统分析入土深度、刀具转速及前进速度对除草扭矩与土壤扰动速度的影响规律。

## 1 水田除草刀结构设计与运动机理分析

### 1.1 机械除草农艺要求

除草深度对幼苗伤害率的影响程度主要由水稻根系的生长特性所决定。水稻的最佳除草时期是插秧后 7~14 d,即幼苗期。当水稻处于幼苗期时,根系类型为主根与次生根并存的须根系结构,根系分布范围扩大,根冠比上升,形成较致密的根群。此阶段主根平均长度为 20~60 mm<sup>[16-17]</sup>。当除草深度大于 40 mm 时,除草刀已切入水稻秧苗主根与次生根交错分布的根系层,其产生的剪切作用与扰动将破坏秧苗根系的稳定结构,导致主根受剪、须根断裂<sup>[18]</sup>。

水田除草刀作业机理及生物分布如图 1(图中  $X_1$  为行距,  $X_2$  为除草刀作业区域,  $X_3$  为稻苗根部宽度,  $h_1$  为稻苗高度,  $h_2$  为稻苗根部分布深度,  $h_3$  为杂草根部分布深度, mm)所示。图 1a 显示了典型水田土层构成与生物分布特征,杂草主要集中于行间浅层区域,根系浅、抗拔力弱;而水稻秧苗根系下扎较深,分布范围广,稳定性强。图 1b 为除草作业过程示意,除草刀在除草刀作业区域  $X_2$  通过耙齿驱动产生旋切与搅拌作用,使行间土壤颗粒剧烈运动,从而实现对杂草的切断、扰动与掩埋<sup>[19]</sup>。然而,这种强扰动会导致土壤颗粒沿除草刀运动方向堆积至秧苗根部区域  $X_3$ ,从而引起根系压埋以及抑制秧苗的正常生长。

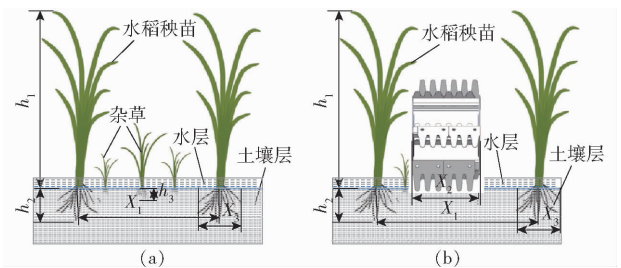


图 1 水田除草刀作业机理及生物分布示意图

Fig. 1 Working mechanism and biological distribution of paddy field weeding knife

为减弱秧苗根部土壤的压埋效应,通过控制除

草刀的转动范围与作业深度,在靠近秧苗一侧形成扰动衰减,有效减弱土体流动与反向堆积。与此同时,机具安装了可调限深结构,可以结合田间除草深度  $H$  与秧苗高度  $h_1$  等参数,实现作业深度与扰动范围的动态调节,从而在不同作业环境下兼顾除草效率与秧苗保护<sup>[20]</sup>。

因此,从农艺角度来看,水田除草作业对扰动的要求尤为突出:一方面要对水稻行间杂草进行有效清除,另一方面又需避免过度扰动对秧苗根系区域产生土壤堆积,实现“柔性扰动、适度翻土”的作业目标。

1.2 除草刀运动分析

为实现除草刀在作业过程中对土壤的有效切入与扰动控制,需要明确其运动学特征与空间轨迹规律。通过建立除草刀复合运动的空间轨迹方程,可定量揭示入土深度、前进速度及刀具转速等关键参数的耦合效应,为除草刀齿部结构优化设计及动力学仿真参数设定提供理论支撑。

除草刀在作业过程中呈现典型的复合运动特征,即除草刀绕自身中心轴进行定轴旋转的同时,随机具整体沿前进方向作水平直线运动。根据刚体平面运动定理,该复合运动可视为匀速直线运动与匀速圆周运动的矢量叠加<sup>[21]</sup>。如图 2(图中  $v$  为除草机的前进速度,  $m/s$ ;  $n$  为除草刀转速,  $r/min$ ;  $R$  为除草刀最大作业半径,取  $185\text{ mm}$ ;  $r$  为点  $A$  到旋转中心的距离,  $mm$ ;  $H$  为除草深度,  $mm$ ) 所示,建立直角坐标系,以除草刀旋转中心为原点  $O$ ,令  $X$  轴正方向与机具前进方向一致,  $Y$  轴正方向竖直向上。

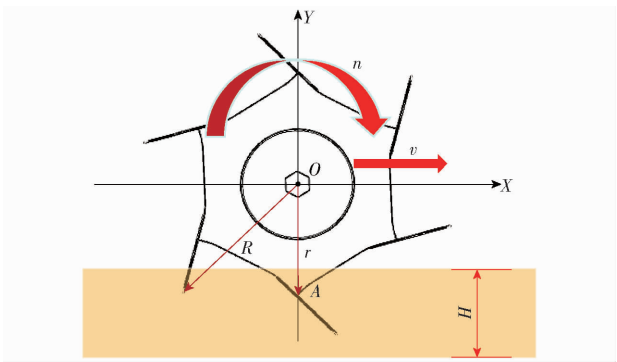


图 2 除草刀运动分析示意图

Fig. 2 Schematic for analyzing motion of weed cutter

为便于分析,定义刀齿上任意点到旋转中心的距离为  $r(r \leq R)$ ,其运动轨迹可用于描述不同点的轨迹与速度变化规律。以刀齿底端特征点  $A$  为研究对象,初始相位取  $Y$  轴负方向,可将其在复合运动作用下的空间路径描述为余摆线轨迹。当刀齿切入土壤阶段(相位角  $\varphi = -\pi/2$ )时,点  $A$  的运动轨迹可表达为

$$\begin{cases} x = vt + r\cos(\omega t + \varphi) \\ y = r\sin(\omega t + \varphi) \\ \omega = \frac{2\pi n}{60} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $r$ ——点  $A$  到旋转中心的距离,  $mm$   
 $t$ ——旋转部件转过的时间,  $s$   
 $\omega$ ——旋转角速度,  $rad/s$

点  $A$  在水平方向与竖直方向上的速度分量为

$$\begin{cases} v_{xA} = \frac{dx}{dt} = v - r\omega\sin(\omega t + \varphi) \\ v_{yA} = \frac{dy}{dt} = r\omega\cos(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (2)$$

点  $A$  的瞬时速度为

$$v_A = \sqrt{v_{xA}^2 + v_{yA}^2} = \sqrt{v^2 + r^2\omega^2 - 2v\omega r\sin(\omega t + \varphi)} \quad (3)$$

为防止除草刀作业时漏除杂草,在除草刀旋转一周时,除草机具沿前进方向驶过的距离应小于或等于除草刀耙齿顶端转过的距离,即

$$\begin{cases} r = R \\ v_{max}t_1 \leq 2\pi r \\ t_1 = \frac{2\pi}{\omega} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $t_1$ ——除草刀旋转一周所需要的时间,  $s$   
 $v_{max}$ ——保证不漏除杂草时允许的最大作业前进速度,  $m/s$

式(4)联立,得到

$$v_{max} \leq \frac{\pi n R}{30} \quad (5)$$

1.3 仿犬齿结构的除草刀设计

当前水田机械除草刀采用的耙齿齿顶呈锐角或锯齿形分布,齿根较深且多呈直线型<sup>[22]</sup>,如图 3a 所示。该类结构在入土初期具备较强的剪切力,适用于硬度较大的土地。然而水田土壤含水率高、黏聚力强,受力后容易发生塑性流动,扰动能量沿刀齿运动方向向周围扩散。在这种扰动下,行间被翻起的土体无法完全回填至原位,而部分土壤颗粒会沿刀齿旋转方向与前进方向共同运动,最终在流动势能的作用下向秧苗根区堆积。

为缓解上述问题,本文基于仿生理念与水田作业需求,提出了一种半圆弧齿顶结构的除草刀设计,如图 3b 所示。研究表明<sup>[23-24]</sup>,部分掠食类动物的犬齿(如犬科动物)在咀嚼或刺穿柔性组织时,其齿顶结构呈半圆弧或者次抛物线轮廓,如图 3d 所示。该类结构能够在切入时有效降低瞬时冲击载荷,实现应力平缓传递。借鉴该仿生原理,本文设计的除草刀齿顶采用光滑连续过渡的半圆弧曲线。该曲线

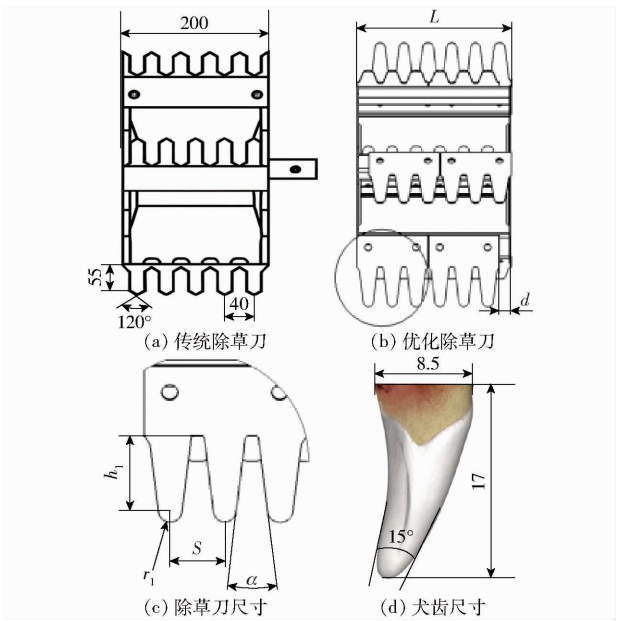


图3 除草刀尺寸对比

Fig. 3 Weeding knife size comparison

形态可有效降低齿面入土阻力,使切向分力方向更为分散,扰动能量在局部范围内逐步衰减并平稳释放。同时,将传统垂直直线型齿根优化为斜线过渡结构,可实现应力均匀传递,提高结构疲劳寿命与整体强度。

除草刀的结构参数设计综合考虑了田间作业条件与整机布置需求。根据双行栽培模式下水稻的平均行距(约 300 mm)与机具轮距限制,结合秧苗根部保护需求,确定单个除草刀的有效扰动宽度不超过 200 mm,因此将除草刀总宽度  $L$  设定为 200 mm。齿高是影响除草刀入土深度与除草效果的关键参数,主要由齿根  $h_1'$  和半圆弧半径  $r_1$  组成。参考前期间调查结果<sup>[25]</sup>,稻田杂草根系主要分布于土壤表层 20 ~ 60 mm 范围内,结合“目标扰动与秧苗根系安全”需求并考虑半圆弧齿顶,最终确定齿高  $h$  为 50 mm。

齿顶曲率是影响入土切削阻力与扰动平滑性的重要参数。依据犬齿结构的研究结果<sup>[26]</sup>,犬科动物犬齿的齿尖曲率半径通常位于 5 ~ 8 mm 区间。因此选取半圆弧齿顶曲率半径  $r_1$  为 6.50 mm,兼顾入土阻力与土壤扰动强度。齿距则直接影响除草均匀性与扰动覆盖率,需避免“重复扰动”与“空扰盲区”现象。设定齿数  $n_1$  为 6、总长  $L$  为 200 mm、边缘保护距离  $d$  (经验值约为 10 mm) 为 10 mm,根据已知条件求出齿距  $s$  为

$$s = \frac{L - d}{n_1} = \frac{200 - 10}{6} \approx 31.167 \text{ mm} \quad (6)$$

齿距  $s$  处于传统除草刀齿距的经验区间 25 ~ 35 mm 内,为确保扰动均匀性与结构紧凑性,最终取整为 30 mm。

齿间夹角借鉴犬科动物犬齿分布特征。相关研究表明<sup>[27]</sup>,其齿间夹角多处于 12° ~ 16° 之间,具备“多点切入-交错锁紧-能量缓释”的复合作用机制。本研究采用非对称交错排列的耙齿分布,兼顾仿生功能与空间布局约束,将齿间夹角  $\alpha$  设定为 14°。

基于上述理论分析,设计了一种半圆弧齿顶结构的水田除草刀。该装置采用模块化装配方案,其核心作业部件由除草刀与动力传输系统构成。其中除草刀由中心轴、耙齿安装座、耙齿侧板和耙齿构成<sup>[28-29]</sup>,采用非对称排列的耙齿布局以改善入土均匀性与排泥性能,其结构示意图如图 4c 所示。作业时,动力系统通过锥齿轮传动驱动除草刀绕中心轴旋转,同时机具沿水平方向前进。除草刀通过高速旋转的耙齿进土来切割或埋压杂草,使杂草失去光合作用和再生能力,达到除草目的。同时,该作业过程能够对土壤表层进行适度松动,提高土壤含氧量,改善水田环境,从而为水稻后续生长创造良好的土壤生态环境。

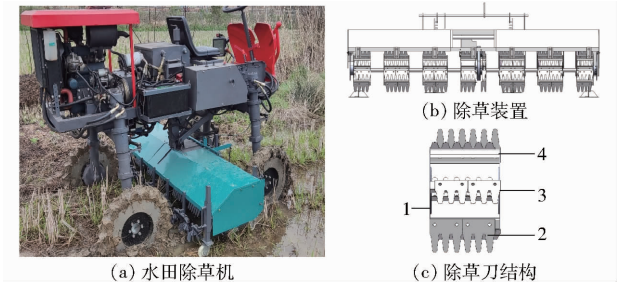


图4 水田除草机与除草刀结构图

Fig. 4 Paddy weeding machine and weeding knife structure diagram

1. 耙齿安装座 2. 耙齿 3. 除草刀中心轴 4. 耙齿侧板

## 2 除草刀离散元仿真

### 2.1 除草刀-土壤离散元模型建立

中国水稻种植区分布广泛,常见的土壤种类为黏土、壤土和砂质黏土<sup>[30-31]</sup>。本研究利用激光粒度分析仪对试验土壤进行测试,结果表明砂质黏土的颗粒组成为:砂粒 26.3%、粉粒 5.6%、黏粒 68.1%。在此基础上,以砂质黏土为研究对象,基于 EDEM 2020 构建了除草刀-砂质黏土耦合的离散元仿真模型,用于模拟水田环境下除草作业中阻力与土壤颗粒的扰动变化。在幼苗期,稻田水层通常维持在浅水状态,且水层深度(通常为 0 ~ 30 mm)远小于除草刀入土深度(30 ~ 60 mm),其对刀具受力与扰动特性的影响相对有限。因此,建模时忽略水层作用,主要研究不同工况参数下除草刀-土壤耦合阻力与土壤扰动变化规律。

在仿真中,土壤被离散为大量球形颗粒单元,其颗粒间的相互作用通过接触力学模型进行描述,包括法向力、切向摩擦力、滚动摩擦力等相互作用。因此,本文采用 Hertz - Mindlin with JKR 土壤模型来模拟水田土壤以增强物理真实性<sup>[32-33]</sup>。该模型在经典 Hertz - Mindlin 模型弹性接触框架的基础上,引入 JKR(Johnson - Kendall - Roberts)表面能理论,考虑了颗粒间因粘附引起的附加接触力,更准确表征土壤中弱胶结性与粘弹耦合行为<sup>[34]</sup>。

使用 Solidworks 2021 建立除草刀的三维几何模型,经格式转换后导入至 EDEM 仿真环境中。为模拟除草刀在稻田土壤中的除草作业,在 EDEM 中构建尺寸为 1 500 mm×600 mm×200 mm 的土槽模型,并将除草刀置于土槽一端作为初始扰动源,如图 5 所示。依据国际土壤质地分类标准,建立由砂粒(粒径 10 mm)、粉粒(8 mm)与黏粒(5 mm)组成的砂质黏土颗粒体系,并依据测试砂质黏土的结果(砂粒 26.3%、粉粒 5.6%、黏粒 68.1%)进行设定,以确保仿真土体能够真实反映砂质黏土的物理特性。设定土壤颗粒与除草刀金属材料的密度、泊松比和剪切模量等材料参数,如表 1 所示。其中泊松比主要通过文献[35-36]获得,但考虑到土壤湿度、颗粒分布等环境因素的差异,对土壤的物理性质进行了测量,包括土壤密度、剪切模量和土壤颗粒的类型特性等,以确保试验结果的代表性。在土壤颗粒床生成阶段,定义了三相土壤颗粒之间的接触参数,包括土壤-土壤、土壤-除草刀的静摩擦因数、滚动摩擦因数、恢复系数以及表面能,如表 2 所示<sup>[37-39]</sup>。通过施加双向匀速往复压实,实现颗粒群体的自组织排布与结构致密化,降低初始孔隙率,提高模拟可靠性。

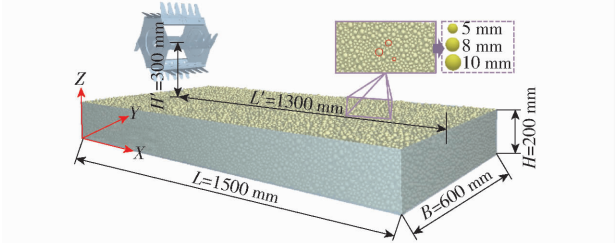


图 5 除草刀与土壤耦合模型

Fig.5 Weed cutter and soil coupling model

表 1 材料参数

Tab.1 Material parameters

| 项目   | 密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 剪切模量 $G/\text{Pa}$ | 泊松比  |
|------|-----------------------------------------|--------------------|------|
| 黏粒土壤 | 1 280                                   | $1\times10^6$      | 0.38 |
| 粉粒土壤 | 1 560                                   | $5\times10^6$      | 0.38 |
| 沙粒土壤 | 1 800                                   | $5\times10^7$      | 0.38 |
| 除草刀  | 7 850                                   | $7.9\times10^{10}$ | 0.30 |

表 2 接触参数

Tab.2 Contact parameters

| 参数                                            | 数值   | 参数                                            | 数值   |
|-----------------------------------------------|------|-----------------------------------------------|------|
| 黏粒-黏粒土壤恢复系数                                   | 0.3  | 黏粒-粉粒土壤恢复系数                                   | 0.5  |
| 黏粒-沙粒土壤恢复系数                                   | 0.5  | 黏粒-沙粒土壤静摩擦因数                                  | 0.5  |
| 黏粒-黏粒土壤静摩擦因数                                  | 0.5  | 黏粒-粉粒土壤静摩擦因数                                  | 0.5  |
| 黏粒-黏粒土壤滚动摩擦因数                                 | 0.05 | 黏粒-粉粒土壤滚动摩擦因数                                 | 0.01 |
| 黏粒-沙粒土壤滚动摩擦因数                                 | 0.01 | 沙粒-沙粒土壤恢复系数                                   | 0.3  |
| 粉粒-粉粒土壤恢复系数                                   | 0.4  | 粉粒-沙粒土壤恢复系数                                   | 0.5  |
| 粉粒-粉粒土壤静摩擦因数                                  | 0.5  | 粉粒-沙粒土壤静摩擦因数                                  | 0.5  |
| 沙粒-沙粒土壤静摩擦因数                                  | 0.6  | 沙粒-沙粒土壤滚动摩擦因数                                 | 0.1  |
| 粉粒-粉粒土壤滚动摩擦因数                                 | 0.05 | 粉粒-沙粒土壤滚动摩擦因数                                 | 0.01 |
| 土壤-除草刀恢复系数                                    | 0.3  | 土壤-除草刀静摩擦因数                                   | 0.5  |
| 土壤-除草刀滚动摩擦因数                                  | 0.01 | 黏粒-沙粒表面能/<br>( $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ) | 0.3  |
| 黏粒-黏粒表面能/<br>( $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ) | 0.5  | 黏粒-粉粒表面能/<br>( $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ) | 0.3  |
| 沙粒-沙粒表面能/<br>( $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ) | 0.1  | 粉粒-沙粒表面能/<br>( $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ) | 0.2  |
| 粉粒-粉粒表面能/<br>( $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ) | 0.3  |                                               |      |

2.2 工况参数仿真优化

在除草作业中,除草刀与土壤发生强烈耦合作用,其运动状态与土壤物理性质共同影响除草效果。为了探明除草刀在不同工况参数下的除草效果和机具所受的阻力变化规律。本文根据文献[40]以及田间经验选取入土深度  $H$ 、转速  $n$  与前进速度  $v$  为影响因素,选取土壤扰动速度  $v_d$  与除草扭矩  $\tau$  为评价指标,采用三因素三水平正交试验设计方法,对除草刀与土壤相互作用过程进行仿真分析,并采用多目标优化设计方法对评价指标进行综合评价。

仿真试验采用双向独立驱动策略,分别定义除草刀的旋转速度与前进速度,以实现除草刀从上到下、从左到右的复合运动。仿真流程设计严格遵循农机作业时序特征,设定总仿真时长 6.0 s,数据采集间隔 0.05 s,具体流程如图 6 所示:0~2.0 s 实施垂直向下与旋转的复合运动,实现渐进式入土;2.0~2.5 s 维持纯旋转状态,通过角动量减少初始接触冲击;2.5~5.5 s 执行前进与旋转的协同运动,模拟田间除草作业的动力学行为;5.5~6.0 s 进入空转阶

段,观测土壤回弹特性。

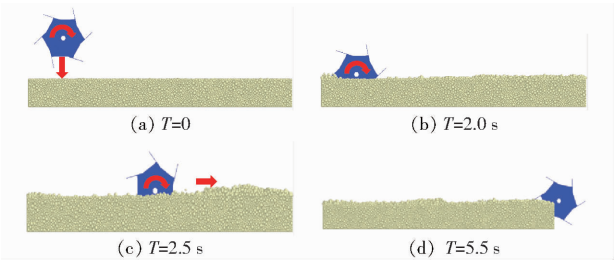


图 6 除草刀仿真运动流程

Fig. 6 Weed cutter simulation movement process

在仿真试验中,依据田间调研以及文献[41],入土深度通常在 30 ~ 50 mm 范围内取值,除草刀转速在 140 ~ 240 r/min 范围内取值,前进速度在 0.6 ~ 1.2 m/s 范围内取值。基于前期机具结构设计,本文针对转速选取 140、160、180 r/min,以更好地贴合实际装备。结合田间作业经验<sup>[42]</sup>,机具前进速度通常约为 0.7 m/s,因此本研究选取 0.6、0.7、0.8 m/s 作为试验工况。入土深度方面,则沿用常规的 30、40、50 mm 3 挡设置,使除草刀在作业过程中能够充分作用于杂草根系分布层并实现适度翻土,从而在保证除草效果的同时兼顾土壤扰动的合理性。该参数组合充分考虑了机械性能与农艺要求的平衡,为仿真试验提供了科学合理的依据。根据上述试验方案,进行了三因素三水平正交试验,具体因素水平见表 3。

表 3 正交试验因素水平

Tab. 3 Orthogonal test factors and levels

| 水平 | 因素          |                                           |                                           |
|----|-------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
|    | 入土深度/<br>mm | 转速/<br>( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) | 前进速度/<br>( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) |
| 1  | 30          | 140                                       | 0.6                                       |
| 2  | 40          | 160                                       | 0.7                                       |
| 3  | 50          | 180                                       | 0.8                                       |

建立的水田环境下除草刀与土壤的动态耦合模型可有效模拟除草刀扰动过程中土壤的破裂、堆积、压实与回填等行为,反映了不同工况参数组合对土壤动力响应的影响。

2.3 不同工况参数下正交试验仿真结果分析

基于三因素三水平正交试验<sup>[43]</sup>的仿真结果,选取扭矩和土壤扰动速度为主要评价指标进行分析,仿真过程中除草刀作用下的扭矩分布云图与土壤颗粒速度云图如图 7 所示。

图 7a 表明,当除草刀作业时,入土深度、前进速度与转速等工况参数的变化直接影响除草刀的受阻特性,引起扭矩的动态波动。从图 7b 可以看出,除草刀在旋转切割过程中对土壤颗粒产生较强的冲击

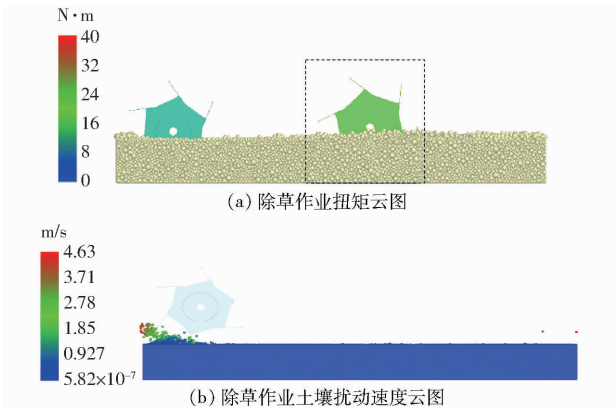


图 7 仿真云图

Fig. 7 Simulated cloud maps

与剪切作用,促使颗粒速度显著提升。刀齿前端及切割面处土壤颗粒速度最大、扰动激烈,并逐步向周围区域扩散。

在水田土壤中作业时,随着除草刀的运动,土壤会发生局部的剪切和位移,特别是在土壤湿润度较高的区域,土壤粒子容易流动并发生位移。这样,作业工具所受到的阻力会周期性变化,导致扭矩呈现出波动的状态。为揭示除草刀在水田作业过程中的扭矩变化规律,对其 4 个典型运动阶段的扭矩动态差异进行了分析,如图 8 所示。图 8a 展示了扭矩随时间变化的堆积图,但由于数据重叠较多,难以清晰观察不同工况下扭矩随时间的变化。为此,图 8b 采用三维分布图对扭矩变化进行了更加直观的展示,图 8c 展示了不同工况下的扭矩-时间分布情况,进一步揭示了各工况下扭矩的时序特征。

在入土扰动阶段(0 ~ 2.0 s),9 组扭矩曲线均呈现渐进式上升趋势,去掉异常值后最大扭矩不超过 20 N·m,表明扭矩随着除草刀入土深度的增加而逐步增加。此时曲线波动幅度较小,归因于土壤尚未形成稳定的抗剪结构,刀具主要克服土壤的初始屈服应力而未触发显著动态阻力。在纯旋转缓冲阶段(2.0 ~ 2.5 s),扭矩曲线呈现小增幅波动,幅度为  $\pm 5 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,整体峰值维持在 28 ~ 32 N·m 区间。理论分析表明,该阶段扭矩变化主要源于土壤内局部扰动及回弹力,若除草刀转速高,触发小冲击波动,扭矩波动显著增加。在主作业阶段(2.5 ~ 5.0 s)表现出显著的动态特性变化,9 组扭矩数据均呈峰值和高频振荡特征,峰值集中分布于 35 ~ 47 N·m 之间。该现象源于刀具在前进与旋转的复合运动模式下与土壤之间形成的周期性啮合作用,进而诱发强烈的非线性动力响应。动力学仿真表明,当平台处于高速前进、深土层、高速旋转的组合工况时,除草刀将强力切入土体并产生深层扰动,使得摩擦阻力急剧上升,系统负载加剧,动力波动频繁;仿真中路径长度有限,作业持续时间

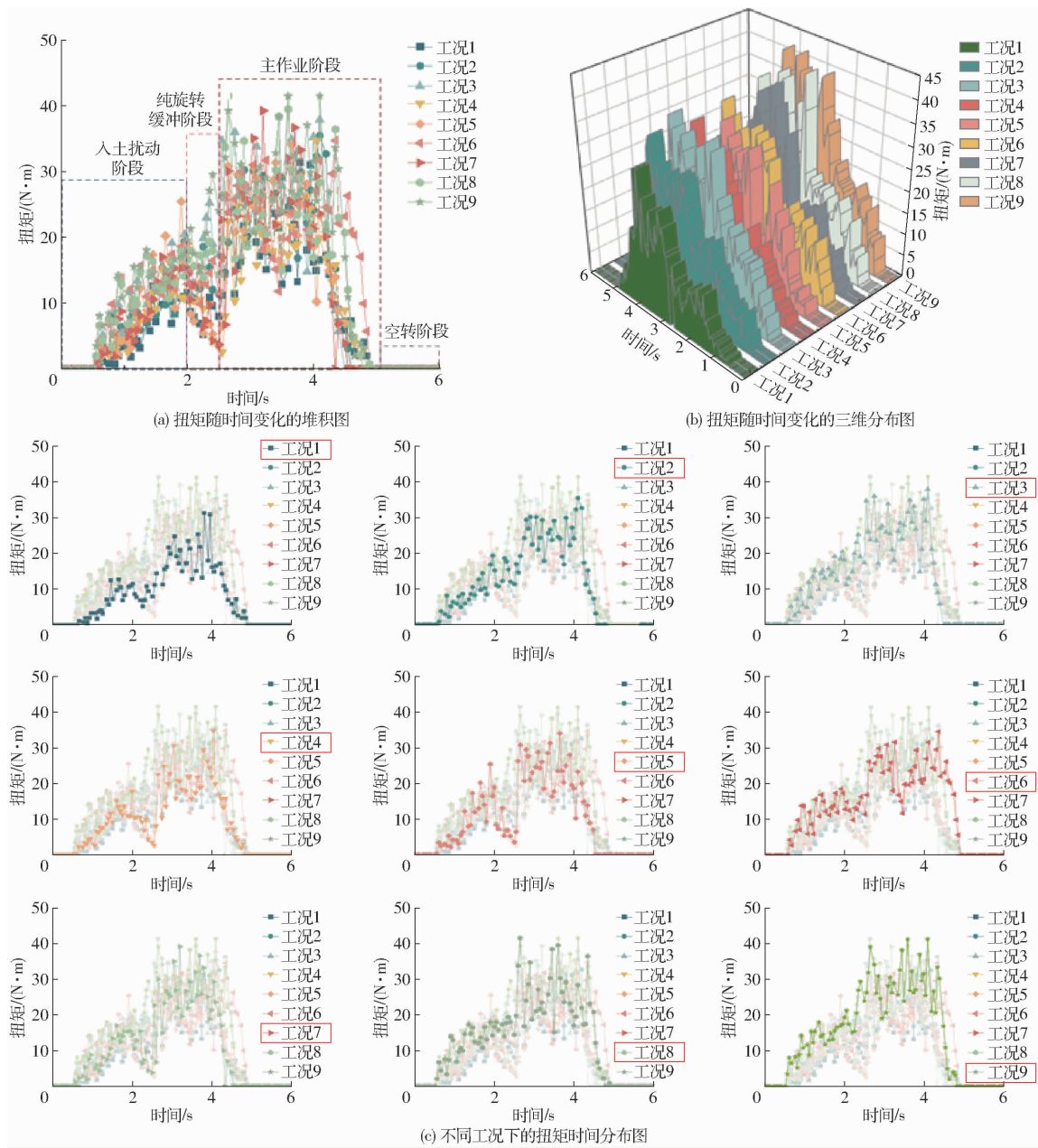


图 8 不同工况下的扭矩时间分布及统计分析

Fig. 8 Torque time distribution and statistical analysis under different working conditions

受到前进速度的直接影响,当前进速度较大时,除草刀在单位时间内更快通过仿真区域;反之,速度较小时平台在土壤中持续作用的时间延长。在空转阶段(5.0~6.0 s),即刀具逐渐脱离土体后,扭矩曲线呈现指数型衰减趋势,反映出除草刀与土壤的接触力迅速减弱。部分工况中,仍可观测到小幅度的振荡波动,主要归因于土壤的黏弹性滞后恢复效应。除草刀离土瞬间,已变形的土壤发生迟滞回弹并对除草刀施加短暂反作用冲击,体现出土体在扰动后的能量恢复与结构重整行为。

扭矩时域曲线不仅揭示了除草刀在作业过程中的扭矩变化,还表明转速和前进速度的变化对扰动的影

响。在工况 1、4、7 低转速下,扭矩都偏小。随着前进速度的提高,除草刀与土壤颗粒的接触时间缩短,扰动持续时间减小,导致颗粒动能传递不足、速度增量减弱,整体扰动强度随之下降。

此外,为更加客观地评价仿生半圆弧齿顶结构的优劣,本文在相同土壤参数及工况下,开展了传统除草刀的除草作业仿真,并与本文仿生除草刀的仿真结果进行对比分析,如图 9 所示。结果表明,在所有工况中仿生除草刀的平均扭矩均低于传统除草刀,降幅为 9.16%~22.70%,且在入土深度较大或转速较高的工况(如工况 2、6、8、9)差异更为显著。结合扭矩-时间曲线可知,仿生除草刀扭矩水平较

低,表明半圆弧齿顶在保证土壤扰动效果的同时,能够平缓入土阶段的冲击载荷,降低传动系统瞬时受力,从而改善作业过程的平稳性与可靠性。

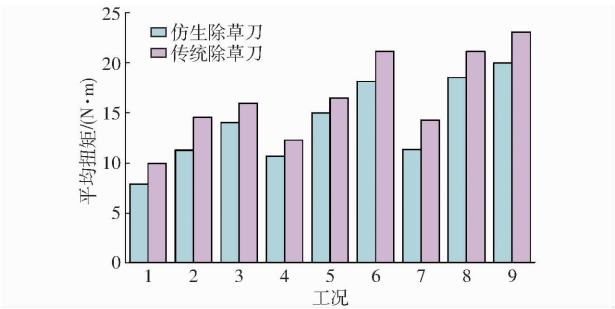


图9 不同工况下两种除草刀的平均扭矩对比  
Fig.9 Comparison of average torque of two weeding knives under different working conditions

2.4 多指标加权综合评分法

在本研究中,除草扭矩与土壤扰动速度均作为评价除草刀作业性能的重要指标,但两者的物理意义和工程要求存在差异。除草扭矩直接反映机械能耗和设备负载,偏高会增加动力消耗和机械磨损;土壤扰动速度则关联除草作业效果及土壤结构破坏程度,过大扰动可能损伤秧苗。因此,单独依赖某一指标难以全面评价作业质量和效率,本文基于三因素三水平正交试验的仿真结果,采用多指标加权综合评分法分析确定除草作业的最优参数<sup>[44]</sup>。试验结果见表4(A、B、C为因素水平值)。

表4 三因素三水平正交试验设计与结果  
Tab.4 Three factors and three levels orthogonal experimental design and results

| 序号 | 因素 |   |   | 除草扭矩           | 扰动速度                | 加权综合  |
|----|----|---|---|----------------|---------------------|-------|
|    | A  | B | C | $x/(N\cdot m)$ | $y/(m\cdot s^{-1})$ | 评分Z   |
| 1  | 1  | 1 | 1 | 7.85           | 1.35                | 0.300 |
| 2  | 1  | 2 | 2 | 11.24          | 1.87                | 0.444 |
| 3  | 1  | 3 | 3 | 14.05          | 2.52                | 0.659 |
| 4  | 2  | 1 | 2 | 10.67          | 1.78                | 0.418 |
| 5  | 2  | 2 | 3 | 14.98          | 1.98                | 0.399 |
| 6  | 2  | 3 | 1 | 18.12          | 2.67                | 0.624 |
| 7  | 3  | 1 | 3 | 11.34          | 1.94                | 0.472 |
| 8  | 3  | 2 | 1 | 18.52          | 2.63                | 0.596 |
| 9  | 3  | 3 | 2 | 19.98          | 2.95                | 0.700 |

依据在除草刀作业区域“除草扭矩越小越优、土壤扰动速度越大越优”的准则,对除草扭矩 $x$ 和土壤扰动速度 $y$ 进行归一化处理。通过归一化映射函数将原始数据标准化至0~1间,以实现不同指标间的可比分析。具体映射设计如下:

对于除草扭矩指标,扭矩越小能耗越少,因此评分函数采用递减线性映射,公式为

$$f(x_i) = 1 - \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \tag{7}$$

式中 $x_{min} \leq x_i \leq x_{max}$ , $f(x_i)$ 是除草扭矩的映射评分函数,值域为 $[0,1]$ ;  $x_i$ 是第*i*号试验的除草扭矩,N·m;  $x_{max}$ 是9组试验结果中除草扭矩的最大值,N·m;  $x_{min}$ 是9组试验结果中除草扭矩的最小值,N·m。

对于土壤扰动速度指标,在除草刀作业区域扰动速度越大作业效果越好,因此评分函数采用递增线性映射,公式为

$$f(y_i) = \frac{y_i - y_{min}}{y_{max} - y_{min}} \tag{8}$$

式中 $y_{min} \leq y_i \leq y_{max}$ , $f(y_i)$ 是土壤扰动速度的映射评分函数,值域为 $[0,1]$ ;  $y_i$ 是第*i*号试验的土壤扰动速度,m/s;  $y_{max}$ 是9组试验结果中土壤扰动速度的最大值,m/s;  $y_{min}$ 是9组试验结果中土壤扰动速度的最小值,m/s。

考虑到除草刀的主要目的是除去杂草,故土壤扰动速度的权值比除草扭矩大,综合分析后得到除草扭矩和土壤扰动速度的最优权值分配为 $\omega_1 = 0.3, \omega_2 = 0.7$ 。由此得到每组试验的加权综合评分 $Z_i$ 表示为

$$Z_i = \omega_1 f(x_i) + \omega_2 f(y_i) \tag{9}$$

多指标加权综合评分结果如图10所示,除草扭矩 $f(x_i)$ 、扰动速度 $f(y_i)$ 的评分曲线波动幅度较大,表明不同因子对两项响应指标均具有显著的调节作用。由图可见,第9组试验在综合评分指标 $Z$ 上表现最优,实现了在低能耗与除草效果之间的较优平衡,对应因子组合为 $A_3B_3C_2$ 。此外,第3组和第6组试验也显示出较高的综合评分,表现出良好的综合作业性能。

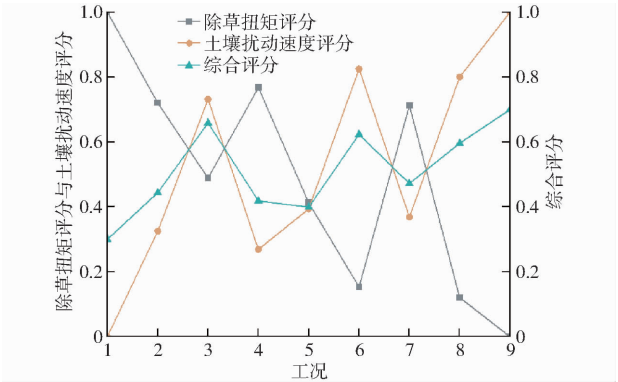


图10 多指标加权综合评分曲线  
Fig.10 Multi-indicator weighted score curves

综上所述,多指标加权综合评分方法能够在兼顾各项指标差异性的基础上,定量评估不同因素组合的综合作业性能,从而为最优参数选择提供依据。其中,除草刀入土深度50 mm、转速180 r/min及机具前进速度0.7 m/s的工况参数组合具备最佳综合作业性能,兼顾低能耗与除草效果。

2.5 极差与方差分析

为评估各作业因素对除草效果的单因素影响程度,对正交试验的结果进行极差分析,如表 5 所示。

表 5 极差分析

Tab. 5 Extreme variance analysis

| 评价指标 | A              | B       | C       |
|------|----------------|---------|---------|
| x    | K <sub>1</sub> | 33. 14  | 29. 86  |
|      | K <sub>2</sub> | 43. 77  | 44. 74  |
|      | K <sub>3</sub> | 49. 84  | 52. 15  |
|      | k <sub>1</sub> | 11. 047 | 9. 953  |
|      | k <sub>2</sub> | 14. 59  | 14. 913 |
|      | k <sub>3</sub> | 16. 613 | 17. 383 |
|      | R              | 5. 567  | 7. 43   |
|      | K <sub>1</sub> | 5. 74   | 5. 07   |
|      | K <sub>2</sub> | 6. 43   | 6. 48   |
| y    | K <sub>3</sub> | 7. 52   | 8. 14   |
|      | k <sub>1</sub> | 1. 913  | 1. 69   |
|      | k <sub>2</sub> | 2. 143  | 2. 16   |
|      | k <sub>3</sub> | 2. 507  | 2. 713  |
|      | R              | 0. 593  | 1. 023  |

分析表 5 中除草扭矩项可知:除草刀转速对除草扭矩的影响较大,其中转速为 140 r/min 时除草扭矩最小,转速为 180 r/min 时除草扭矩最大;随着除草刀入土深度增加,除草扭矩增加;随着机具前进速度增加,除草扭矩逐渐减小,但变化不明显。

分析表 5 中土壤扰动速度项可知:不同转速下,除草刀对土壤产生的扰动特征存在显著差异。在转速为 140 r/min 的条件下作业对土壤扰动最小,在转速为 180 r/min 的条件下作业对土壤扰动最大;随着除草刀入土深度的增大,除草刀对土壤扰动速度随之增加;除草刀对土壤的扰动速度随着机具前进速度的增加而减小,但变化不明显。

通过对正交试验结果的极差分析,可以看出除草刀转速对除草扭矩和土壤扰动速度的影响最为显著。为进一步明确各因素对除草扭矩  $x$  与土壤扰动速度  $y$  的影响程度,对试验数据进行了单因素方差分析,如表 6 所示。

在除草扭矩  $x$  的方差分析中,转速  $B$  的  $F$  值为 4. 979,  $P$  值为 0. 053,接近显著性水平 0. 05,说明转速对除草扭矩具有较强的影响,属于临界显著水平。 $A$  和  $C$  的  $P$  值分别为 0. 280 和 0. 938,均远高于 0. 05,表明其对除草扭矩的影响不显著。在土壤扰动速度  $y$  的方差分析中,转速  $B$  的  $F$  值为 7. 631,  $P$  值为 0. 022,达到 0. 05 显著性水平,说明转速是土壤扰动速度的主要影响因素。入土深度  $A$  和前进速度  $C$  的  $P$  值分别为 0. 431 和 0. 947,均未达到显

表 6 方差分析

Tab. 6 Variance analysis

| 因素    | x       |           |          | y          |            |          |
|-------|---------|-----------|----------|------------|------------|----------|
|       | A       | B         | C        | A          | B          | C        |
| 平方和   | 47. 637 | 85. 907   | 2. 894   | 0. 537     | 1. 574     | 0. 008   |
| 均方    | 23. 818 | 42. 954   | 1. 447   | 0. 268     | 0. 787     | 0. 004   |
| 误差平方和 | 90. 033 | 51. 763   | 134. 776 | 1. 656     | 0. 619     | 2. 185   |
| 误差均方  | 15. 006 | 8. 627    | 22. 463  | 0. 276     | 0. 103     | 0. 364   |
| F     | 1. 587  | 4. 979    | 0. 064   | 0. 973     | 7. 631     | 0. 011   |
| P     | 0. 28 * | 0. 053 ** | 0. 938 * | 0. 022 *** | 0. 022 *** | 0. 989 * |

注: \* 表示不显著 ( $P > 0. 05$ ), \*\* 表示临界显著 ( $P \approx 0. 05$ ), \*\*\* 表示显著 ( $P < 0. 05$ )。

著性水平,说明其对抗动速度的贡献较小。综合分析可知,转速  $B$  在两项响应中均表现出较高的影响作用,且对抗动速度的影响达到显著水平,为影响负载和扰动强度的关键因素。入土深度  $A$  和前进速度  $C$  虽在试验中有所作用,但其变化对响应变量的影响较小,可作为次要优化对象。

综上所述,各因素对除草扭矩影响由大到小的顺序为:除草刀转速、除草刀入土深度、机具前进速度;各因素对土壤扰动速度影响由大到小顺序为:除草刀转速、除草刀入土深度、机具前进速度。因此,工况参数的选择应避免简单叠加效应,需考虑机械能耗与土壤扰动的平衡。物理机制上,高转速增加了刀齿切割频率和能量输入,扩大了土壤扰动范围;入土深度的增加则提升了刀齿与土壤的接触面积及摩擦阻力;而前进速度对抗动影响较小,可能因土壤响应具有一定时间滞后性所致。

3 田间试验

3.1 试验过程

于江苏省南京市六合区(北纬 32. 3°,东经 118. 8°)典型砂质黏土稻田开展田间试验,作业区域在水稻播种前的排水湿田状态下开展。此时田面水层已排干,仅保留浅湿泥层,以保证土体可塑性并减少水层流动对采集扰动轮廓的干扰。为量化土体<sup>[45]</sup>,激光粒度分析结果表明,土壤主要组分为砂粒 26. 3%、粉粒 5. 6%、黏粒 68. 1%,体现出砂质黏土较高的适用性与代表性。由于试验目的在于验证除草刀的土壤扰动形态与仿真结果一致性,而非除草率本身,故选择“湿润裸田”状态,以避免水层波动对抗动轮廓的影响。

搭载的水田除草机如图 11 所示,除草装置通过平行四杆机构悬挂在水田除草机中部,通过液压杆控制除草装置的水平升降。测试区间为长 10 m、宽 3 m 的地块,使用安装在除草刀主轴上的扭矩传感器(ZRN507 扭矩传感器,北京中瑞能仪表技术有限

公司)测量扭矩数据,测得田间试验主轴扭矩平均值为 17.57 N·m。

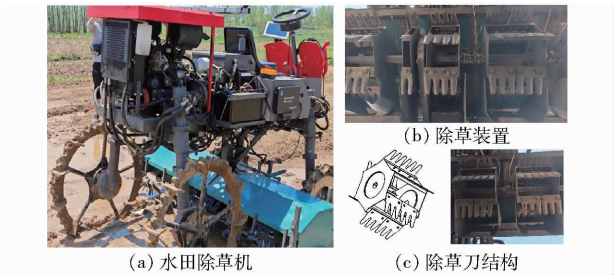


图 11 田间试验装置  
Fig. 11 Field test device

为验证仿真结果中土壤扰动轮廓与田间试验结果的一致性,本文在试验结束后采集了土壤扰动轮廓图像,并将试验数据与仿真结果进行对比,以评估除草刀扰动对水田土壤的影响并验证仿真模型的可靠性。除草作业前,在预定作业路径两侧按等距布置测点,通过设置标尺,对作业后的土壤表面轮廓进行采集。轮廓数据包括扰动后的土壤表面高程变化、入土深度以及扰动区域的宽度与轮廓度等参数。

3.2 土壤轮廓几何参数验证

为了验证离散元仿真模型在除草刀与土壤耦合模拟中的准确性和可信度,本研究通过比较田间试验和仿真试验中获得的土壤扰动深度及扰动轮廓线进行验证。田间试验已获得土壤扰动深度和扰动轮廓线的数据,现在需要分析除草仿真作业过程中不同位置(200~1 400 mm)下纵向剖面图的土壤轮廓形态的变化,如图 12 所示。该图不仅直观展现了纵向截面位置的土壤扰动形貌,也为后续扰动范围与颗粒抛散的定量分析提供了理论依据。土壤扰动轮廓具有明显的时间滞后性和空间积累性;除草刀旋转所产生的扰动并非对称扩散,而是耙齿尾部“推+抛”作用下形成堆积隆起。

图 12a 为除草刀即将离土状态,扰动强度随之减弱。此阶段土壤轮廓线从高扰动状态回弹趋于平稳,颗粒回流与自重沉降作用占主导,扰动深度和宽度明显收缩,反映出土壤的黏弹性恢复能力。图 12b~12e 为除草刀主作业阶段,刀齿与土壤发生连续剪切与挤压作用,扰动强度逐步增强。轮廓线明显下陷并呈深凹形,颗粒流动增强,部分土体被抛撒至后方。扰动深度与扰动宽度同步增长,代表耙齿能量输入的高峰区。此阶段体现了除草刀强力挤压和高速剪切土壤以及土壤重构堆积的典型耦合行为,验证了除草刀复合作用下的深层扰动能力。图 12f 为除草刀入土阶段,除草刀处于纯旋转状态,颗粒在齿顶前缘发生局部松动并上抛。轮廓线基本平整,局部出现微小沉降,扰动深度浅。

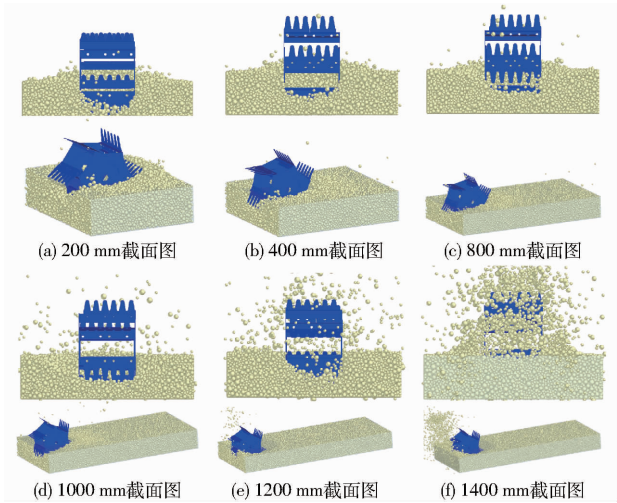


图 12 仿真试验各截面的土壤轮廓度对比  
Fig. 12 Comparison of soil profiles for each section of simulation test

在分析了除草刀作业过程中的土壤扰动形态及其变化,以及不同作业阶段的土壤扰动行为后,采用土壤扰动区域截面积  $A$  与峰值高度  $H$  两项指标量化土壤扰动形态。考虑到扰动轮廓线的测量存在一定的困难,本研究选择通过扰动区域的面积进行对比分析,以更加客观地评估田间试验与仿真试验结果的一致性。其中,轮廓线曲面积  $A$  反映了翻土量,而峰值高度  $H$  则体现了垄沟的深度,从而提供了对土壤扰动形态的全面定量描述。

由于土壤轮廓的测量具有较大的误差,特别是在土壤高度的波动和面积的计算中,传统的手绘方法具有一定的局限性。为了提高精度,采用 Python 图像处理与数学建模方法,根据轮廓线的坐标数据,使用多边形面积公式和最大峰值法进行计算。基于多边形面积公式计算闭合轮廓的曲面积  $A$ ,公式为

$$A = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^N (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \right| \tag{10}$$

式中  $(x_i, y_i)$ ——轮廓线的离散坐标  
 $N$ ——坐标点数

峰值高度  $H$  是轮廓线最高点与基准平面的垂直距离,公式为

$$H = \max(y_i) - \min(y_i) \tag{11}$$

式中  $y_i$ ——轮廓线的每个数据点垂直坐标  
基于田间试验与仿真试验的土壤轮廓剖面进行对比,如图 13 所示。由图 13a 可知,田间试验的土壤扰动宽度约为 23.7 cm,仿真试验的扰动宽度为 24.3 cm,两者差异约 2.5%;仿真试验的扰动高度 4 cm 小于田间试验(4.3 cm),说明仿真模型较好地模拟了除草刀对土壤的扰动。由图 13b 可知,田间试验的轮廓红线与仿真试验的轮廓蓝线整体趋势一致,均呈现典型的凹陷形,反映了除草刀在作业过程

中对土壤的推挤与抛撒作用。图 13c 土壤在 45° 倾斜方向的三维视图帮助理解土壤颗粒的空间推移与堆积。然而,二者在局部细节上存在差异:仿真曲线较为平滑,而田间曲线则表现出更多微小波动。这些波动揭示了真实土壤结构的复杂性与颗粒间的非均质性。

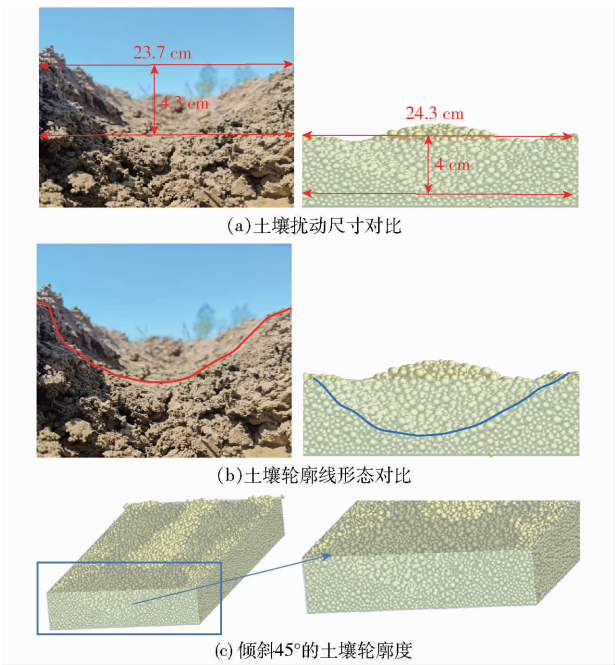


图 13 田间试验与仿真试验土壤轮廓度对比  
Fig. 13 Comparison of soil profile between field and simulation tests

几何参数对比结果如表 7 所示,仿真与田间试验的面积最大差异为 12.63%,表明仿真模型能够较好地模拟除草刀对土壤的扰动,且符合土壤的实际扰动范围。仿真与田间试验的峰值高度最大差异为 9.3%,仿真模型略低于田间实际情况,可能与土壤的含水量等实际因素有关。

表 7 几何参数对比

Tab. 7 Geometrical parameters comparison

| 类型   | 截面位置/<br>mm | 面积/<br>mm <sup>2</sup> | 高度/<br>mm | 面积相对<br>误差/% | 高度相对<br>误差/% |
|------|-------------|------------------------|-----------|--------------|--------------|
| 田间试验 |             | 13 634                 | 43        |              |              |
|      | 200         | 12 701                 | 47        | 6.84         | 9.30         |
| 仿真试验 | 800         | 11 912                 | 45        | 12.63        | 4.65         |
|      | 1 200       | 14 614                 | 45        | 7.19         | 4.65         |

本研究通过对比田间与仿真试验的土壤扰动深度及轮廓线,验证了离散元仿真模型在除草刀与土壤耦合模拟中的准确性和可信度。尽管仿真结果与田间试验存在一定误差,但整体趋势吻合,表明仿真模型能较好地模拟除草刀与土壤的耦合作用。

4 结论

(1) 基于仿生方法与水田作业需求,设计了一种光滑连续过渡的半圆弧齿顶结构的除草刀,并将齿根优化为斜线过渡结构,可实现应力均匀传递,提高结构疲劳寿命与整体强度。

(2) 基于 EDEM 平台构建了除草刀与稻田砂质黏土的耦合仿真模型,揭示了入土深度、除草刀转速、前进速度对除草扭矩与土壤扰动速度的影响规律。极差与方差分析结果表明,除草刀转速为主导因素,入土深度次之,前进速度影响最小。

(3) 采用多指标加权评分方法综合评价作业性能,在兼顾除草效率与能耗负载的基础上,得到最优工况参数组合为:入土深度 50 mm、除草刀转速 180 r/min、前进速度 0.7 m/s。曲线分析表明,合理设定权重可有效平衡扰动和能耗双目标需求。

(4) 仿真结果与田间实测数据在土壤轮廓几何参数等数据的误差均控制在 10% 以内,验证了模型的准确性与可靠性。

参 考 文 献

[1] 吴尚,张纪利,李保同,等. 千金子对水稻生长的影响及其经济阈值[J]. 中国农业科学, 2015, 48(3): 469–478.  
WU Shang, ZHANG Jili, LI Baotong, et al. Effects of Chijinzhi on rice growth and its economic threshold[J]. Chinese Agricultural Science, 2015, 48(3): 469–478. (in Chinese)

[2] 于改莲. 稻田除草剂的正确施用方法[J]. 农药, 2001(12): 43–45.  
YU Gailian. Correct application method of herbicides in paddy fields[J]. Pesticide, 2001(12): 43–45. (in Chinese)

[3] 吕威,董黎,孙宇涵,等. 浅谈国内外杂草控制方法[J]. 中国农学通报, 2018, 34(11): 34–39.  
LÜ Wei, DONG Li, SUN Yuhuan, et al. Introduction to weed control methods at home and abroad[J]. Chinese Agronomy Bulletin, 2018, 34(11): 34–39. (in Chinese)

[4] 李东升,张莲洁,盖志武,等. 国内外除草技术研究现状[J]. 森林工程, 2002(1): 17–18.  
LI Dongsheng, ZHANG Lianjie, GAI Zhiwu, et al. Current status of research on weed control technology at home and abroad[J]. Forest Engineering, 2002(1): 17–18. (in Chinese)

[5] 张朝贤,倪汉文,魏守辉,等. 杂草抗药性研究进展[J]. 中国农业科学, 2009, 42(4): 1274–1289.  
ZHANG Chaoxian, NI Hanwen, WEI Shouhui, et al. Progress of weed resistance research[J]. China Agricultural Science, 2009, 42(4): 1274–1289. (in Chinese)

[6] 董立尧,高原,房加鹏,等. 我国水稻田杂草抗药性研究进展[J]. 植物保护, 2018, 44(5): 69–76.  
DONG Liyao, GAO Yuan, FANG Jiapeng, et al. Progress of weed resistance research in rice fields in China[J]. Plant

- Protection, 2018, 44(5): 69–76. (in Chinese)
- [7] 张贺,张喆. 田间除草机械刀具关键技术与装置分析[J]. 农业技术与装备, 2019(11): 90–92.  
ZHANG He, ZHANG Zhe. Analysis of key technologies and devices of field weeding mechanical tools[J]. Agricultural Technology and Equipment, 2019(11): 90–92. (in Chinese)
- [8] 郑小兰,王瑞娇,赵群法,等. 根际氧含量影响植物生长的生理生态机制研究进展[J]. 植物生态学报, 2017, 41(7): 805–814.  
ZHENG Xiaolan, WANG Ruijiao, ZHAO Qunfa, et al. Progress in the study of physiological and ecological mechanisms of inter-root oxygen content affecting plant growth[J]. Journal of Plant Ecology, 2017, 41(7): 805–814. (in Chinese)
- [9] 和同産業株式会社. 水田の草取り機: 4057492[P]. 2007–12–21.
- [10] 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構,株式会社クボタ,井関農機株式会社. 水田除草機: 3965430[P]. 2007–06–08.
- [11] 吴崇友,张敏,金诚谦,等. 2BYS–6 型水田中耕除草机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 51–54.  
WU Chongyou, ZHANG Min, JIN Chengqian, et al. Design and test of 2BYS–6 hydroponic mid-tillage weeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 51–54. (in Chinese)
- [12] 王金武,牛春亮,张春建,等. 3ZS–150 型水稻中耕除草机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 75–79.  
WANG Jinwu, NIU Chunliang, ZHANG Chunjian, et al. Design and test of 3ZS–150 rice mid-tillage weeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 75–79. (in Chinese)
- [13] 齐龙,马旭,谭祖庭,等. 步进式水田中耕除草机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 31–35.  
QI Long, MA Xu, TAN Zuting, et al. Development and test of step-type hydroponic mid-tillage weeder[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(14): 31–35. (in Chinese)
- [14] 齐龙,赵柳霖,马旭,等. 3GY–1920 型宽幅水田中耕除草机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 47–55.  
QI Long, ZHAO Liulin, MA Xu, et al. Design and test of 3GY–1920 wide hydroponic mid-tillage weeder[J]. Journal of the CSAE, 2017, 33(8): 47–55. (in Chinese)
- [15] 张春岭. 六头螺旋秸秆还田耕整机关键部件设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.  
ZHANG Chunling. Design and test of key components of six-head spiral straw return tiller[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [16] 孙静文,陈温福,臧春明,等. 水稻根系研究进展[J]. 沈阳农业大学学报, 2002, 33(6): 466–470.  
SUN Jingwen, CHEN Wenfu, ZANG Chunming, et al. Progress of rice root system[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2002, 33(6): 466–470. (in Chinese)
- [17] FANG Longyu, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of a biomimetic duckbill-like vibration chain for physical weed control during the rice tillering stage[J]. Biomimetics, 2023, 8(5): 430.
- [18] GAO Yizhuo, ZHU Yan, ZHANG Yuping, et al. Physiological characteristics of root regeneration in rice seedlings[J]. Agronomy, 2023, 13(7): 1772.
- [19] 王金峰,高观保,闫东伟,等. 水田电动双行深施肥除草机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 46–57.  
WANG Jinfeng, GAO Guanbao, YAN Dongwei, et al. Design and test of electric two-row deep fertiliser weeder for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 46–57. (in Chinese)
- [20] 刘闯,齐龙,马旭,等. 高效型水田行-株间同步机械除草装置设计与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(10): 78–82.  
LIU Chuang, QI Long, MA Xu, et al. Design and test of high-efficiency synchronised mechanical weeding device between rows and plants in paddy fields[J]. Journal of Agricultural Mechanisation Research, 2021, 43(10): 78–82. (in Chinese)
- [21] 王金峰,王金武,闫东伟,等. 3SCJ–2 型水田行间除草机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 71–78,202.  
WANG Jinfeng, WANG Jinwu, YAN Dongwei, et al. Design and test of 3SCJ–2 row weeder for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 71–78,202. (in Chinese)
- [22] 吴康豪,徐豪聪,陈东顺,等. 水田行株间同步高效除草装置的设计与试验[J]. 农机化研究, 2025, 47(7): 72–79.  
WU Kanghao, XU Haocong, CHEN Dongshun, et al. Design and test of a synchronised high-efficiency weeding device between rows and plants in paddy fields[J]. Journal of Agricultural Mechanisation Research, 2025, 47(7): 72–79. (in Chinese)
- [23] 华李成. 若干哺乳动物牙齿结构性能与食性的关系研究[D]. 重庆: 西南交通大学, 2016.  
HUA Licheng. A study on the relationship between structural properties of teeth and feeding habits in several mammals[D]. Chongqing: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [24] 马圣胜. 不同食性哺乳动物牙齿的摩擦学特性、力学性能对比分析[D]. 长春: 吉林大学, 2015.  
MA Shengsheng. Comparative analysis of tribological properties and mechanical properties of teeth from different predatory mammals[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- [25] 李琳,陈蔚燕. 几种化合物对稗草种子萌发和根系发育的影响[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(12): 18–22,49.  
LI Lin, CHEN Weiyan. Effects of several compounds on seed germination and root development of barnyard grass[J]. Experimental Technology and Management, 2022, 39(12): 18–22,49. (in Chinese)
- [26] SOUKUP J W, JEFFERY J, HETZEL S J, et al. Morphological quantification of the maxillary canine tooth in the domestic dog (*Canis lupus familiaris*) [J]. Annals of Anatomy-Anatomischer Anzeiger, 2023, 246: 152041.
- [27] POLLOCK T I, PANAGIOTOPOULOU O, HOCKING D P, et al. Taking a stab at modelling canine tooth biomechanics in mammalian carnivores with beam theory and finite-element analysis[J]. Royal Society Open Science, 2022, 9(10): 220701.

[28] XIAO M, ZHAO Y, WANG H, et al. Design and test of hydraulic driving system for undercarriage of paddy field weeder[J]. Agriculture, 2024, 14(4): 595.

[29] JIAO Jinkang, WANG Zhimin, LUO Haowen, et al. Development of a mechanical weeder and experiment on the growth, yield and quality of rice[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(3): 92–99.

[30] 丁启朔,任骏,BELAL Eisa Adam,等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 38–48. DING Qishuo, REN Jun, BELAL Eisa Adam, et al. Discrete meta-analysis of deep loosening process in wet clay rice soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 38–48. (in Chinese)

[31] 郑侃,何进,李洪文,等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 62–72. ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on folded breaking edge deep loosening shovel based on discrete element deep loosening soil model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 62–72. (in Chinese)

[32] 王洪昌,丁凯权,夏经久,等. 基于坍落度试验的扰动饱和水田土壤离散元参数标定[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊 2): 222–230. WANG Hongchang, DING Kaiquan, XIA Jingjiu, et al. Calibration of discrete element parameters of disturbed saturated paddy soil based on slump test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 2): 222–230. (in Chinese)

[33] 单海勇,严旖旎,沈悦,等. 麦-玉耕作秸秆混土还田模式下离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2024, 14(8): 72–81. SHAN Haiyong, YAN Yini, SHEN Yue, et al. Calibration of discrete element parameters in wheat-maize mixed tillage straw returning mode[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 14(8): 72–81. (in Chinese)

[34] 王甜,陈雄飞,刘俊安,等. 水稻机械直播的土壤表层泥浆离散元参数标定[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(1): 232–240. WANG Tian, CHEN Xiongfei, LIU Junan, et al. Calibration of discrete elemental parameters of soil surface mud for mechanical direct seeding of rice[J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2024, 46(1): 232–240. (in Chinese)

[35] TANG Z, GONG H, WU S, et al. Modelling of paddy soil using the CFD–DEM coupling method[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 226: 105591.

[36] 焦晋康,胡炼,陈高隆,等. 水田行间除草装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(24): 11–22. JIAO Jinkang, HU Lian, CHEN Gaolong, et al. Design and experiment of weeding device between paddy fields[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(24): 11–22. (in Chinese)

[37] DU K, WANG J, LIU M, et al. Parameter calibration for discrete element simulation of the interaction between loose soil and thrown components after ginseng land tillage[J]. Processes, 2024, 12(2): 246.

[38] XUE Kang, GAO Kejie, KUANG Fuming, et al. Machinery-plant-paddy soil coupling model based numerical simulation method of mechanical transplanting process of big rice seedling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107053.

[39] 贾乐心,江应星,孙佳,等. 基于 EDEM 的圆盘弹齿组合式水田平地机圆盘转辊仿真与试验[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(6): 1406–1414. JIA Lexin, JIANG Yingxing, SUN Jia, et al. EDEM-based simulation and test of disc rotary roller of disc spring-tooth combined paddy field grader[J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2021, 43(6): 1406–1414. (in Chinese)

[40] 翟力欣,姬长英,丁启朔,等. 犁体结构参数与工作参数优化设计[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 57–62. ZHAI Lixin, JI Changying, DING Qishuo, et al. Optimal design of structural and operating parameters of plough body[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 57–62. (in Chinese)

[41] 齐龙,梁仲维,马旭,等. 耙压式除草轮与水田土壤作用的流固耦合仿真分析及验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 29–37. QI Long, LIANG Zhongwei, MA Xu, et al. Simulation analysis and validation of fluid-solid coupling of rake-pressure weed wheel acting with paddy soil[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 29–37. (in Chinese)

[42] 田亮. 乘坐式水田中耕除草装置设计与试验研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2022. TIAN Liang. Design and experimental research on ride-on hydroponic mid-tillage weeding device [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[43] ZHONG Peizhao, JIA Weiqing, YANG Wenwu, et al. Calibration and testing of parameters for the discrete element simulation of soil particles in paddy fields[J]. Agriculture, 2024, 14(1): 118.

[44] TANG Han, XU Changsu, WANG Qi, et al. Analysis of the mechanism and performance optimization of burying weeding with a self-propelled inter row weeder for paddy field environments[J]. Applied Sciences, 2021, 11(21): 9798.

[45] ZHENG H, DUAN W, LI Z, et al. A CFD–DEM model for simulating mechanical responses of saturated paddy soil: model development and experimental verification[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 239: 110896.