

基于套种模式的中耕除草机设计与试验

王 龙^{1,2} 王乘清^{1,2} 石 露^{1,2} 陈学庚³ 颜利民³ 王旭峰^{1,2} 胡 灿^{1,2}
(1. 塔里木大学机械电气化工程学院, 阿拉尔 843300; 2. 新疆特色农林产物利用与装备兵团重点实验室, 阿拉尔 843300;
3. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003)

摘要: 针对新疆地区“冬小麦+”套种模式小麦灌浆期后茬作物播种前, 中耕除草作业缺乏适用机械的问题, 本文设计了一种具有单体仿形功能的中耕除草机, 阐述了整机结构与工作原理, 并对仿形机构、旋耕刀动态运动过程等进行了分析。结合测定的典型杂草(藜草)特征参数, 构建了基于 Bonding V2 的藜草与土壤复合体离散元模型, 仿真分析揭示了藜草与土壤复合体失效过程, 并明确了中耕除草机作业速度和刀辊转速是影响作业效果的主要参数; 采用 Box - Behnken 试验与多目标优化求解, 得出最佳作业参数组合为: 刀辊转速 270 r/min、作业速度 3 km/h、耕深 70 mm。以最佳参数组合开展田间试验, 试验结果表明, 机具除草率、碎土率和小麦伤苗率分别为 95.3%、89.4% 和 4.23%, 耕深稳定性系数为 91.6%, 田间碎土率与仿真结果基本一致。该机具作业稳定, 能够满足套种模式下行间除草、碎土、低伤苗和稳定耕深作业要求。

关键词: 中耕除草机; 套种模式; 离散元法; 草土复合体

中图分类号: S222.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)20-0214-12 OSID: 

Design and Experiment of Cultivator and Weeder Based on Intercropping Mode

Wang Long^{1,2} Wang Chengqing^{1,2} Shi Lu^{1,2} Chen Xuegeng³ Yan Limin³ Wang Xufeng^{1,2} Hu Can^{1,2}
(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Tarim University, Alar 843300, China
2. Xinjiang Production and Construction Corps(XPCC) Key Laboratory of Utilization and
Equipment of Special Agricultural and Forestry Products in Southern Xinjiang, Alar 843300, China
3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: Aiming to address the issue of lack of suitable machinery for intertillage and weeding operations after grain-filling stage of winter wheat and before sowing of subsequent crops in “winter wheat +” intercropping mode in Xinjiang, a mid-tillage and weeding machine with individual contour-following functionality was designed. The overall structure and working principle of the machine were elaborated, and the contour-following mechanism and dynamic motion process of the rotary tiller blade were analyzed. Based on the measured characteristic parameters of typical weed *Chenopodium album*, a discrete element model of *Chenopodium album* and soil complex was constructed by using Bonding V2. The simulation analysis revealed the failure process of the *Chenopodium album* and soil complex, and identified the operating speed of mid-tillage and weeding machine and the rotational speed of blade roller as main parameters affecting the operation effect. Using Box - Behnken experimentation and multi-objective optimization, the optimal operating parameter combination of blade roller rotational speed, operating speed, and tilling depth was determined to be 270 r/min, 3 km/h, and 70 mm, respectively. Field tests were conducted by using this optimal parameter combination. The results showed that the weed removal rate, soil fragmentation rate, and wheat seedling damage rate were 95.3%, 89.4%, and 4.23%, respectively. The tilling depth stability coefficient was 91.6%, and the field soil fragmentation rate was basically consistent with the simulation results. The machine operated stably and could meet the requirements of intertillage and weeding, soil fragmentation, low seedling damage, and stable tilling depth in the intercropping mode.

Key words: cultivator and weeder; intercropping mode; discrete element method; grass-soil complex

收稿日期: 2026-04-21 修回日期: 2026-05-20

基金项目: 兵团重大科技计划项目(2025AA013)和第一师阿拉尔市科技计划项目(2025ZB03)

作者简介: 王龙(1988—),男,教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: 77323127@qq.com

通信作者: 王旭峰(1974—),男,教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: wxfwyq@126.com

0 引言

新疆作为我国关键商品粮生产基地,受光热条件与无霜期短的气候制约,一年两熟耕作体系下作物有效生育期不足,严重限制产量提升^[1-2]。因此冬小麦+玉米、棉花和辣椒等作物套种模式得到推广,利用 2 种作物共生期延长后茬作物有效生长期,从而提高土地单产^[3]。该模式下后一茬作物播种时正处于小麦灌浆期,预留行内土壤易板结且杂草生长旺盛,需在不损伤两侧小麦植株前提下完成行间中耕除草与碎土作业,但现有机具难以适配该套种模式农艺作业要求。

近年来,国内外学者围绕不同作物和种植模式下机械除草装备开展了大量研究。Xie 等^[4]针对小麦田研制了低功耗、高效率智能除草机;Tang 等^[5]面向大豆玉米带状复合种植模式设计了行间除草机;王金峰等^[6]研制了稻田行间除草机;许静等^[7]设计了油茶林立式螺旋松土除草机;曹成茂等^[8]研制了抛推组合式草土分离除草机;丁力等^[9]开展了大豆行间驱拨组合式除草机设计与试验。上述研究在行间除草、松土、减阻和低功耗作业方面取得了较好效果,但多面向单一作物或常规行距条件,针对新疆“冬小麦+”套种模式下小麦灌浆期预留行中耕除草、低伤苗作业及耕深稳定控制的研究仍较少。

离散元法已成为研究土壤-触土部件互作、植物材料破碎及根土复合体失效过程的重要方法。Walunj 等^[10]综述了土壤-植物-机械系统离散元建模研究;Zou 等^[11]建立了菠菜根土复合体离散元模型,并对根土-振动铲互作过程进行优化;Du 等^[12]利用离散元法研究了旋耕机作业过程土壤掩埋与混合性能;Huang 等^[13]将多目标优化用于旋耕作业参数匹配,实现了碎土质量、耕深稳定性和功率消耗的协调优化。国内学者也在作物茎秆、根土复合体和触土部件离散元建模方面开展了相关研究^[14-15]。但目前针对旱田杂草-土壤复合体在旋耕刀作用下断裂破碎、根土粘结失效及作业阻力变化研究仍不充分,且缺少与田间除草率、伤苗率、耕深稳定性等指标的综合验证。

针对新疆“冬小麦+”套种模式小麦灌浆期预留行中耕除草需求,本文设计一种具有单体仿形功能的中耕除草机。结合藜草茎秆与主根剪切试验,构建藜草-土壤复合体离散元模型,分析旋耕刀作用下草土复合体破碎规律,以藜草破碎率、碎土率和耕作阻力为评价指标开展多因素仿真试验与多目标参数优化,最后通过田间试验对除草率、碎土率、小麦伤苗率和耕深稳定性进行验证,以期套种模式下

中耕除草机具设计及作业参数优化提供依据。

1 整机结构与工作原理

新疆“小麦+”套种模式如图 1 所示,冬小麦于 10 月中下旬播种,次年 5 月中下旬小麦灌浆期在预留行内进行套种。空间布局上,小麦种植行与套种作物预留行宽度均为 52 cm,小麦播种行数为 6 行,行距为 10~11 cm,套种作物播种行为 2 行,行距为 30 cm。中耕除草作业最佳窗口期为小麦灌浆期且套种作物播种前。此时,预留行内土壤较为板结,且伴生杂草生长旺盛,需在不损伤两侧小麦的前提下完成行间除草与碎土,为后茬作物播种提供疏松平整的种床条件。

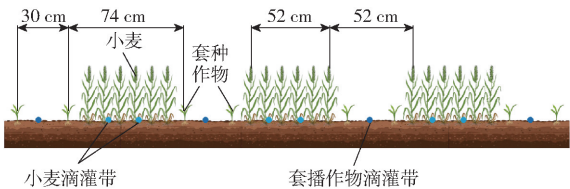


图 1 套种模式小麦种植农艺示意图
Fig. 1 Schematic of wheat planting in intercropping mode

基于套种模式设计的中耕除草机整机结构如图 2 所示,主要由旋耕刀盘、限深轮、传动链条箱、变速箱、仿形调节器、碎土镇压轮等部分组成。

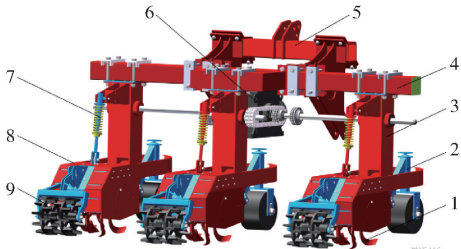


图 2 中耕除草机整机结构
Fig. 2 Complete machine structure of cultivator and weeder
1. 旋耕刀盘 2. 限深轮 3. 传动链条箱 4. 大梁 5. 前悬挂
6. 变速箱 7. 仿形调节器 8. 可调节罩壳 9. 碎土镇压轮

中耕除草机通过三点悬挂与拖拉机配套连接,轮胎行走在预留空行中间,中耕除草机传动轴离地间隙为 700 mm,可顺利跨越灌浆期小麦,动力经中央变速箱与传动轴减速增扭后传递至仿形单体。该单体通过二级链传动至旋耕刀完成中耕除草作业。同时该机具有一机多用的功能,中耕除草单体作业幅宽可调,范围为 380~600 mm,旋耕刀盘可快速更换为灭茬刀盘用于小麦收后灭茬作业。整机主要技术性能参数如表 1 所示。

2 中耕除草机关键部件设计

2.1 耕深自适应调节仿形机构设计

中耕除草机单体如图 3 所示,主要由二级链传

表 1 中耕除草机性能参数

Tab.1 Performance parameters of cultivator and weeder

参数	数值
配套功率/kW	≥66.2
除草灭茬行数/行	3~5
作业速度/(km·h ⁻¹)	3~5
整机尺寸/(mm×mm×mm)	2 460×1 960×1 280
单组作业幅宽/mm	380~600
作业深度/mm	30~150
结构质量/kg	785
输出轴转速/(r·min ⁻¹)	270
工作宽度/mm	2 460

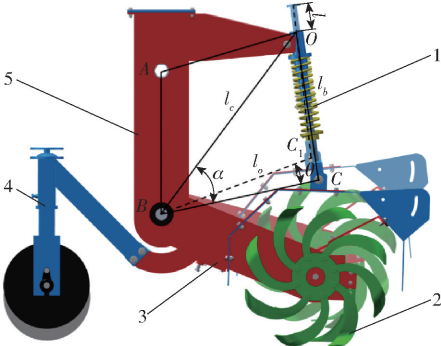


图 3 中耕除草机单体结构

Fig.3 Single-unit structure of cultivator and weeder

1. 仿形调节器 2. 旋耕刀盘 3. 二级传动链条箱 4. 限深轮
5. 一级传动链条箱

动机、仿形调节器、旋耕刀盘和限深轮等组成。为提高中耕除草作业过程旋耕刀对地表起伏的跟随能力,减小耕深波动,采用限深轮、弹簧和曲柄滑块机构设计自适应仿形方案。

设地表起伏曲线为正弦函数,则地表轮廓 y_D 可表示为

$$y_D = H + h_F \sin \frac{2\pi x_f}{E} \tag{1}$$

- 式中 H ——旋耕刀工作深度,mm
- h_F ——地表最大起伏高度,mm
- E ——地表波长,mm
- x_f ——机具前进距离,mm

考虑限深轮相对旋耕刀存在水平距离 L_r ,由于限深轮对地表起伏的感知相对于旋耕刀存在一定滞后,旋耕刀深度曲线 y_c 表达式为

$$y_c = h_F \sin \frac{2\pi (x_f - L_r)}{E} \tag{2}$$

旋耕刀实际作业深度 D 为

$$D = y_D - y_c \tag{3}$$

将式(1)和式(2)代入式(3)得

$$D = H + h_F \sin \frac{2\pi x_f}{E} - h_F \sin \left(\frac{2\pi x_f}{E} - \frac{2\pi L_r}{E} \right) \tag{4}$$

对式(4)关于机具前进距离 x_f 求导,可得耕深

变化率为

$$\frac{dD}{dx_f} = \frac{2\pi h_F}{E} \left(\cos \frac{2\pi x_f}{E} - \cos \frac{2\pi (x_f - L_r)}{E} \right) \tag{5}$$

由式(5)可知,当 $L_r = 0$ 时,耕深保持恒定。当 $L_r \neq 0$ 时,出现深度波动且限深轮与旋耕刀的水平距离越近,仿形限深效果越好。但过小间距会导致限深轮与传动链条箱发生干涉。综合考虑后,选用直径 260 mm 限深轮,通过中间传动轴同心圆弧板安装于二级传动链条箱底部,与旋耕刀输出轴保持 800 mm 间距。

中耕除草机仿形机构简化后的曲柄滑块机构如图 3 所示。仿形调节器支撑座为滑块, AB 为一级传动链条箱, AO 为梯形延长臂,其中点 O 为连接仿形调节器与梯形延长臂的连接点,点 B 为二级链条箱连接点, θ 为机具跟随地面起伏仿形角。仿形调节器伸缩杆 OC 为原动件, OC_1 为极限压缩位置,通过仿形调节器伸缩杆直线运动保证机具耕深一致性。

仿形调节器伸缩杆压缩量 l 与机具仿形角 θ 的关系为

$$\theta = \alpha - \frac{180}{\pi} \arccos \frac{l_c^2 + l_o^2 - (l_b - l)^2}{2l_c l_o} \tag{6}$$

式中 α —— OB 与 BC 的夹角, ($^\circ$)

- l_c —— OB 长度,mm
- l_o —— BC 长度,mm
- l_b ——仿形调节器伸缩杆长度,mm

当机器处于静止状态时,仿形调节器伸缩杆压缩量 l 等于 0 mm, α 为固定值 40° 。 l_c 为 653 mm, l_o 为 480 mm, l_b 为 420 mm。当 l 到达 90 mm 时, $\theta = 10.9^\circ$,根据计算得两者间关系如表 2 所示。

表 2 仿形调节器压缩量 l 与仿形角 θ 关系

Tab.2 Relationship between compression amount l of contour regulator and contour angle θ

压缩量 l /mm	仿形角 $\theta/(^\circ)$	压缩量 l /mm	仿形角 $\theta/(^\circ)$
0	0	50	6.01
10	1.20	60	7.22
20	2.39	70	8.44
30	3.59	80	9.66
40	4.80	90	10.90

为进一步分析仿形调节器在田间地表起伏作用下动态响应特性,将限深轮-弹簧仿形调节器-旋耕单体系统简化为单自由度弹簧阻尼系统。

设仿形调节器初始压缩量为 l_0 ,地表起伏引起的动态附加压缩量为 l_d ,则 t 时刻仿形调节器瞬时压缩量 l 为

$$l = l_0 + l_d \tag{7}$$

设地表起伏引起的限深轮垂直方向位移 q 为

$$q = h_f \sin(\Omega t) \quad (8)$$

$$\text{其中 } \Omega = \frac{2\pi \times 1000 v_m}{E} \quad (9)$$

式中 Ω ——地表起伏变化角频率, rad/s

v_m ——配套功率前进速度, m/s

t ——时间, s

将限深轮、仿形调节器和旋耕单体组成的系统简化为单自由度弹簧阻尼系统。设旋耕单体等效质量为 m_e , 仿形调节器等效刚度为 k_e , 阻尼系数为 c_e , 则动态附加压缩量 l_d 满足

$$m_e \ddot{l}_d + c_e \dot{l}_d + k_e l_d = m_e \Omega^2 h_f \sin(\Omega t) \quad (10)$$

式中 $\dot{l}_d$ ——仿形调节器动态压缩速度, mm/s

$\ddot{l}_d$ ——仿形调节器动态压缩加速度, mm/s²

系统固有角频率 ω_n 和阻尼比 ζ 分别为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_e}{m_e}} \quad (11)$$

$$\zeta = \frac{c_e}{2 \sqrt{k_e m_e}} \quad (12)$$

频率比 r 为

$$r = \frac{\Omega}{\omega_n} = \Omega \sqrt{\frac{m_e}{k_e}} \quad (13)$$

由单自由度系统稳态响应关系可得, 仿形调节器动态附加压缩量幅值为

$$A_l = h_f \frac{r^2}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (14)$$

式中 A_l ——地表起伏引起的仿形调节器动态附加压缩量幅值, mm

由式(14)可知, 地表起伏会引起仿形调节器动态附加压缩量变化。结合式(6)、(7)可知, 仿形角 θ 由仿形调节器瞬时压缩量 l 决定。因此, 当动态附加压缩量达到幅值 A_l 时, 仿形角动态变化幅值可表示为

$$|\Delta\theta|_{\max} \approx |\theta(l_0 + A_l) - \theta l_0| \quad (15)$$

式中 $|\Delta\theta|_{\max}$ ——仿形角动态变化幅值, (°)

由式(9)~(15)可知, 当前进速度 v_m 增大或地表起伏波长 E 减小时, 地表起伏变化角频率 Ω 增大, 频率比 r 随之变化, 仿形调节器动态附加压缩量幅值 A_l 增大, 进而引起仿形角波动增大, 导致旋耕刀耕深稳定性下降。当系统固有角频率 ω_n 明显高于地表起伏变化角频率时, 仿形机构能够较好跟随地表起伏, 耕深波动较小。结合结构参数 $l_e = 653$ mm、 $l_o = 480$ mm、 $l_b = 420$ mm, 在 $l_0 = 45$ mm 计算可得, 压缩量每变化 10 mm, 仿形角约变化 1.21°。因此, 合理匹配仿形调节器刚度、阻尼系数和作业速度, 有利于减小耕深波动, 提高机具田间仿形稳定性。

2.2 旋耕除草刀辊运动学分析

旋耕刀在工作时作正旋运动, 旋转方向与配套功率前进方向一致。旋耕刀绝对运动由机组的直线前进运动和刀辊的匀速圆周运动合成^[16]。建立直角坐标系如图4所示, 以时间 $t=0$ 时刻刀轴回转中心为坐标原点, 以机具前进方向为 x 轴, 垂直向下为 y 轴正向。以 xOy 为投影面, 设旋耕刀刃上点 P 坐标为 $P(x, y)$, 运动方程可表示为

$$\begin{cases} x = v_m t + R \cos(\omega t) \\ y = R \sin(\omega t) \end{cases} \quad (16)$$

式中 R ——旋耕刀回转半径, mm

ω ——旋耕装置刀辊角速度, rad/s

旋耕刀刃上点 P 运动轨迹如图4所示。

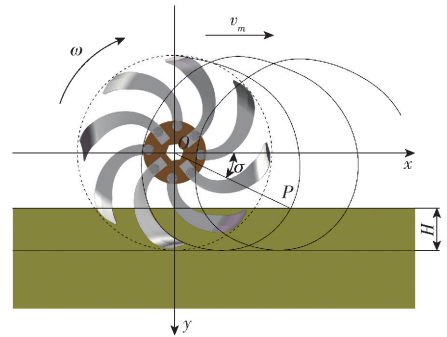


图4 旋耕刀刃上点的运动轨迹

Fig. 4 Motion trajectory of points on rotary tiller blade

对式(16)关于时间 t 求导, 可得点 P 分速度

$$\begin{cases} v_x = v_m - R\omega \sin(\omega t) \\ v_y = R\omega \cos(\omega t) \end{cases} \quad (17)$$

则旋耕刀刃上点 P 切削速度 v_c 为

$$v_c = \sqrt{v_m^2 + (R\omega)^2 - 2v_m R\omega \sin(\omega t)} \quad (18)$$

由式(18)可知, 切削速度随相位角呈周期性变化。在 ωt 切土行程中, 速度大小与方向不断变化, 直接影响切削能耗与土壤破碎效果。为明确旋耕刀有效切削的运动学边界条件, 设作业深度为 H , 刀刃接触地表的时间为 t , 刀刃接触地表瞬间入土角为 σ , 其几何关系满足

$$\sigma = \omega t = \arcsin \frac{R-H}{R} \quad (19)$$

将式(19)代入式(17)中, 可得入土瞬间水平分速度 v_x 为

$$v_x = v_m - \omega(R-H) \quad (20)$$

依据旋耕作业过程, 为避免刀背挤压未耕土壤产生推土效应, 并确保刀刃具备向后的滑切能力, 入土瞬间水平分速度 v_x 须指向 x 轴负向, 即满足 $v_x < 0$ 。由此导出角速度 ω 临界约束条件为

$$\omega \geq \frac{|v_m - v_x|}{R-H} \quad (21)$$

为保证有效切削,需满足 $R\omega\sin(\omega t) > v_m$, 转换为刀辊转速 n 约束不等式

$$n \geq 30 \frac{v_m - v_x}{\pi(R - H)} \tag{22}$$

式(22)揭示了旋耕除草机结构参数与作业参数之间的耦合关系。在耕深 H 与作业速度 v_m 由农艺要求确定的前提下,刀辊转速 n 与回转半径 R 呈显著负相关。结果表明,在整机结构允许范围内,适当增大刀辊回转半径 R ,不仅有利于降低临界转速 n ,从而减少振动与功耗,还能改善刀具通过性与耐磨性,为样机关键部件参数设计选型提供了理论依据。

2.3 旋耕刀侧切刃切割动力学分析

旋耕刀侧切刃是切割杂草与破碎土壤的主要作用界面,其动力学特性直接决定了机具功耗、断根效果及防缠绕性能。为探究侧切刃在高速旋转状态下切割过程,建立基于阿基米德螺旋线轮廓的侧切刃切割动力学模型,分析滑切发生的临界力学条件及运动学参数对切割性能的影响^[17]。

侧切刃轮廓的阿基米德螺旋线曲线方程为

$$\begin{aligned} \rho &= \sqrt{R^2 + Q^2 - 2Q\sqrt{2RH - H^2}} + \\ &\frac{\rho_n - \sqrt{R^2 + Q^2 - 2S\sqrt{2RH - H^2}}}{\beta_n} \beta \end{aligned} \tag{23}$$

式中 ρ ——螺旋线任意一点极径,mm
 Q ——设计切土节距,mm
 ρ_n ——螺旋线终点的极径,mm
 H ——旋耕刀耕深,mm
 β ——螺旋线任意一点极角,rad
 β_n ——螺旋线终点的极角,rad

阿基米德螺旋线终点的极角 β_n 与末端处滑切角 τ 几何约束关系为

$$\beta_n = (\rho_n - \sqrt{R^2 + S^2 - 2S\sqrt{2RH - H^2}}) \frac{\tan\tau}{\rho_n} \tag{24}$$

如图 5 (F_1 为旋耕刀边缘曲线在点 L_1 处的法向反力,N; f_1 为点 L_1 旋耕刀刀曲线的切向摩擦力,N; T_1 为旋耕刀口曲线在 L_1 点处的切向力,N; M_1 为点 L_1 旋耕刀轨迹上的切向力,N) 所示,系统展示了旋耕刀侧切刃从 L_1 点到 L_2 点切割杂草完整过程,同时旋耕刀与杂草在 L_1 点到 L_2 点的动态关系相同。取质量为 m 的杂草进行分析,杂草在点 L_1 处受到法向反力 F_1 和切向摩擦 f_1 ,法向反力 F_1 沿旋耕刀轨迹和侧切刃曲线切向分解为 T_1 和 M_1 。为了保证旋耕刀在操作过程使杂草沿边缘曲线滑动直至完全脱离,须保证 T_1 大于 f_1 ,由图 5 可得

$$\begin{cases} T_2 = M_2 \tan\tau_k \\ f_2 = \mu F_2 \\ \mu = \tan\varphi \end{cases} \tag{25}$$

式中 φ ——杂草与旋耕刀之间摩擦角,(°)
 μ ——杂草与旋耕刀之间摩擦因数
 τ_k ——动态滑切角,(°)

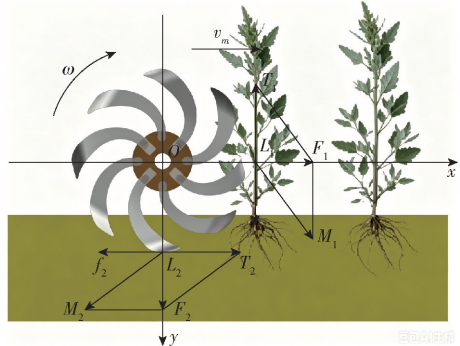


图 5 旋耕刀侧切刃切割杂草受力分析图
Fig. 5 Force analysis diagram of rotary tillage blade cutting weeds with side cutting edge

为减少旋耕刀在工作中的阻力,需减小旋耕刀刀口曲线上的法向力,增大旋耕刀刀口曲线上切向力,动态滑切角需满足

$$\begin{cases} f_2 < T_2 \\ \mu < \tan\tau_k \\ \tan\varphi < \tan\tau \end{cases} \tag{26}$$

在旋耕作业中,刀具复合运动会改变刃口与材料相对速度方向,导致有效滑切角发生偏移。动态滑切角 τ_k 与静态滑切角 τ 之间存在关系

$$\tau_k = \tau - \Delta\tau = \tau - \arctan \frac{\sqrt{\rho^2 - (R - a)^2}}{\lambda \rho^2 - (R - a)} \tag{27}$$

式中 $\Delta\tau$ ——滑切角衰减量,(°)
 a ——切土时刀刃上某一点离耕底距离,mm
 λ ——旋耕速比

结合式(27),随着刀辊转速降低或速比 λ 减小, $\Delta\tau$ 增大,导致动态滑切角 τ_k 显著小于静态滑切角 τ ,增加了滑切失效风险。结合文献[18],杂草与钢摩擦因数为 0.3 ~ 0.5,摩擦角为 16.7° ~ 26.6°。为满足式(27)动力学判据,即在考虑运动学衰减 $\Delta\tau$ 最不利工况下仍保证 $\tau_k > 26.6^\circ$,设计静态滑切角 τ 必须预留足够安全阈值。相关研究表明^[19],滑切角是影响切割阻力和滑切效果的重要结构参数,往复滑切刀刃口滑切角合理范围为 31° ~ 59°。综合考虑切削能耗与结构强度,选定侧刃末端静态滑切角 τ 为 40°。

依据 GB/T 5668—2017 《旋耕机》及文献[20],结合农艺要求,为满足最大耕深 100 mm 且旋耕刀

临界切割线速度 v_0 不低于 4.5 m/s, 旋耕装置回转半径取 228 mm, 计算设计的理论最小转速 n 为 242.4 r/min。为确保动力学性能稳定性, 结合后续仿真优化参数, 最终将旋耕刀转速设定为 270 r/min。

3 基于 EDEM 的离散元仿真

3.1 藜草离散元模型构建

为构建草-土复合体离散元模型并确定藜草颗粒粘结键断裂阈值, 开展田间杂草调查。结果表明, 田间杂草主要包括藜草、狗尾草和马齿苋等, 其中藜草根系发达、茎秆直径较大、木质化程度高, 除草难度较大, 故选其为典型建模对象。挖取 20 株根部完整的藜草, 测得茎秆和主根最粗处平均直径分别为 5.1 mm 和 4.6 mm, 为离散元建模提供尺寸依据。

采用质构仪开展剪切破坏试验, 选取接近平均直径的茎秆与主根作为试样, 使用厚度为 1.2 mm、刃口角为 45° 的不锈钢刀片, 设剪切位移为 10 mm、速度为 1 mm/s, 分别对茎和根进行 20 次重复试验, 测得茎秆和主根极限剪切力平均值分别为 110.3、305.9 N, 作为仿真接触模型临界应力标定依据。

利用 EDEM 构建与物理试样尺寸一致的藜草茎秆和主根模型。根据植物材料离散元建模需兼顾有效性与计算效率的原则, 对模型进行合理简化, 并以物理剪切峰值力为目标进行参数标定^[10]。结果表明, 茎秆实测峰值为 110.3 N, 仿真峰值为 110.9 N, 相对误差为 0.54%。主根实测峰值为 305.9 N, 仿真峰值为 314.5 N, 相对误差为 2.81%。仿真结果与物理试验在断裂行为和峰值载荷上吻合较好, 说明所建立的藜草离散元模型能够反映其受力破碎特性, 最终标定参数见表 3。

表 3 藜草离散元模型接触参数

Tab.3 Contact parameters of discrete element model for chenopod

参数	茎秆	主根
密度/(kg·m ⁻³)	998	1 425
剪切模量/MPa	37.90	75.50
泊松比	0.35	0.25
恢复系数	0.30	0.40
静摩擦因数	0.35	0.50
动摩擦因数	0.15	0.20
与切刀间恢复系数	0.30	0.45
与切刀间静摩擦因数	0.30	0.80
与切刀间动摩擦因数	0.05	0.18
颗粒粘结刚度/(N·m ⁻³)	1.7×10 ⁹	2.0×10 ⁹
颗粒临界应力/Pa	3.0×10 ⁷	4.0×10 ⁷
颗粒粘结半径系数	2.90	3.50

藜草主要由茎、根、叶组成, 其中茎秆与主根是

旋耕除草过程中承受切断、拉拔和根土粘结破坏的主要结构。叶片较薄, 不参与根土固结, 对根系断裂及刀具受载影响较小。已有植物材料离散元建模研究表明, 以切割破坏为主要研究对象时, 可围绕主要承力结构进行合理简化与参数标定^[15,21]。因此, 在 EDEM 建模中简化叶片结构, 重点构建藜草茎秆、主根及须根模型, 如图 6 所示。

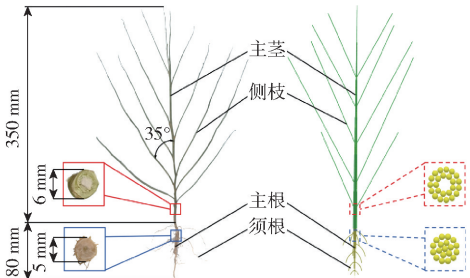


图 6 藜草实物与 EDEM 建模

Fig.6 *Chenopodium album* physical object and EDEM modeling

藜草茎秆主茎直立, 高度为 200 ~ 1 500 mm, 基部直径为 5 ~ 15 mm, 并由基部向顶端逐渐变细, 自基部向上为 50 ~ 100 mm 处开始产生分枝, 分枝数量通常为 5 ~ 15 条, 呈 30° ~ 60° 斜升状, 分枝直径为 2 ~ 8 mm, 形态与主茎相似但更纤细。藜草茎秆横截面呈近圆形, 为典型的非均质复合结构, 中心髓部占断面面积的 1/3 ~ 1/2, 呈白色疏松状, 质地柔软; 外层皮坚韧, 内侧环状排布的维管束为主要承力结构。在建模时构建由基部至顶端直径变细的中空茎秆结构, 以模拟其“硬皮软髓”的力学特征。

藜草根由 1 条主根及若干侧生须根组成, 主根整体呈圆锥形, 长度为 300 ~ 500 mm, 根基部最粗, 直径 5 ~ 12 mm。主根横切面呈圆形, 质地紧实坚韧, 断面无空腔。在 EDEM 建模时, 将主根构建为圆锥形实体颗粒结构, 并在其周围建立须根模型, 以表征藜草根系致密承力和根土粘结特性。

3.2 草-土复合体离散元模型构建

基于标定的藜草离散元模型参数, 在 EDEM 中构建草-土复合体模型, 选用半径 3 mm 单一球形颗粒作为土壤基本构成单元, 建立长 × 宽 × 高为 1 000 mm × 500 mm × 300 mm 土槽模型。为实现土壤颗粒与藜草根系空间耦合, 采用“先植草、后填土”的建模方式。根据田间杂草密度和农艺要求, 采用坐标定位法将藜草模型布置于土槽中, 模拟田间杂草空间分布。

利用 EDEM 颗粒工厂在土槽上方动态生成土壤颗粒, 采用定量生成方式控制土壤初始密实度, 土壤颗粒总数设置为 460 000 个, 颗粒生成阶段仿真时间为 2 s。为提高颗粒进入土槽的稳定性和生成

效率,颗粒以速度 0.3 m/s 沿竖直向下方向运动,直至颗粒体系总动能趋于稳定、土壤表面高度基本不再变化。

土壤颗粒体系稳定后,激活 Hertz – Mindlin with

Bonding V2 接触模型进行固结处理。参考新疆典型农田土壤离散元参数标定及黏性土壤颗粒间粘结参数标定相关研究^[22–24]设定土壤离散元参数。草–土复合体离散元模型接触参数如表 4 所示。

表 4 草–土复合体离散元模型接触参数

Tab.4 Contact parameters of discrete element model for grass – soil complex			
参数	数值	参数	数值
土壤颗粒泊松比	0.35	茎秆–根动摩擦因数	0.17
土壤密度/(kg·m ⁻³)	1 250	土壤–根恢复系数	0.6
土壤颗粒剪切模量/Pa	1.25 × 10 ⁶	土壤–根静摩擦因数	0.6
旋耕刀泊松比	0.3	土壤–根动摩擦因数	0.3
旋耕刀密度/(kg·m ⁻³)	7 860	土壤–茎秆恢复系数	0.4
旋耕刀剪切模量/Pa	7.9 × 10 ¹⁰	土壤–茎秆静摩擦因数	0.6
土壤–土壤恢复系数	0.6	土壤–茎秆动摩擦因数	0.06
土壤–土壤静摩擦因数	0.34	茎秆–根粘结刚度/(N·m ⁻³)	1.7 × 10 ⁹
土壤–土壤动摩擦因数	0.2	茎秆–根临界应力/Pa	3 × 10 ⁷
土壤–旋耕刀恢复系数	0.6	茎秆–根粘结半径	2.9
土壤–旋耕刀静摩擦因数	0.3	土壤间粘结刚度/(N·m ⁻³)	7 × 10 ⁵
土壤–刀具动摩擦因数	0.18	土壤间临界应力/Pa	5 × 10 ⁵
茎秆–根恢复系数	0.35	土壤间粘结半径系数	5.5
茎秆–根静摩擦因数	0.4		

Hertz – Mindlin with Bonding V2 接触模型分别应用于土壤颗粒间、藜草根系与土壤颗粒间以及藜草内部颗粒间,使土壤与藜草根系形成具有连续力学特性的草–土复合体,用于模拟旋耕作业过程中土壤破碎、根土粘结键断裂及藜草根茎失效过程。随后将旋耕除草机单体模型导入 EDEM 仿真环境中,并设置刀辊转速、作业速度和耕深等作业参数,完成仿真系统搭建,如图 7 所示。

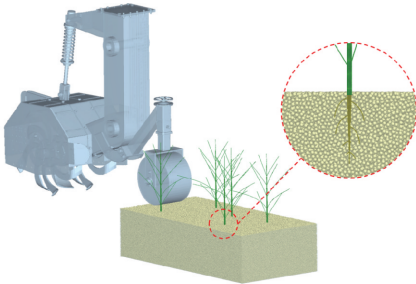


图 7 草土复合体离散元建模

Fig.7 Discrete element modeling of grass – soil composite

3.3 作业参数对藜草破碎效果的影响

3.3.1 作业速度对破碎效果与轨迹的影响

作业速度直接决定旋耕刀切削节距,进而对漏切率与破碎率产生影响。在刀辊转速 280 r/min、耕深 60 mm 条件下,对不同作业速度下藜草最终破碎状态及局部放大特征进行对比分析,如图 8 所示。

由图 8 可知,在作业速度 3 km/h 工况下,旋耕刀对藜草茎秆和主根的作用时间较长,切削节距较

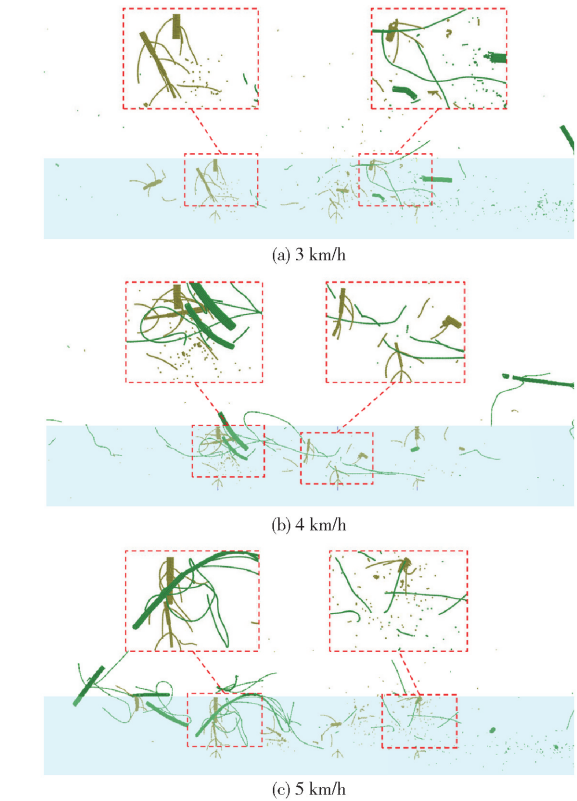


图 8 不同速度下藜草破碎情况与破碎轨迹

Fig.8 Crushing conditions and trajectories of chenopod at different speeds

小,根茎均被切分为较短碎段,局部放大图中可见主根断裂较为充分、残留长度较短,且大块根茎残体较少,说明低速条件下刀刃对杂草具有较强的切断能力。在作业速度 4 km/h 工况下,藜草茎秆与主根同

样能够实现较充分破碎,碎块分布相对均匀,局部区域内既无明显超长残茬,也未出现大面积团聚,表明该速度下刀具切削、抛撒与二次碰撞破碎过程较为协调。相比之下,在作业速度 5 km/h 工况下,由于机具前进速度增大,刀刃对单位区域内杂草的作用次数减少,局部放大图中可见部分根茎残段长度明显增加,个别根系未被完全切断,碎块尺寸偏大,存在一定漏切风险。

根部破碎速度变化曲线如图 9 所示,不同作业速度下根部颗粒破碎速度及其稳定性存在明显差异。从破碎强度看,作业速度 3 km/h 工况下速度峰值最高,表明该速度下根部颗粒瞬时受冲击最强,破碎强度最大;作业速度 4 km/h 工况次之;作业速度 5 km/h 工况峰值最低,破碎作用相对较弱。从速度稳定性看,作业速度 3 km/h 工况下速度曲线波动幅度最大,表明其破碎过程稳定性相对较差;作业速度 5 km/h 工况下速度水平较低,且后期衰减较快,过程连续性不足;作业速度 4 km/h 工况下速度变化相对平缓且连续,波动幅度适中,表现出较好的运动稳定性。

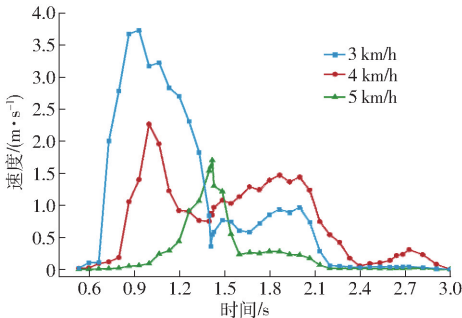


图 9 不同速度下藜草根茎破碎速度变化曲线
Fig. 9 Trajectory speed of chenopod root crushing at different speeds

综合分析可知,较低作业速度有利于增强藜草根茎的切断效果并提高瞬时破碎强度,但速度波动较大;较高作业速度会因切削节距增大而削弱破碎充分性,增加漏切和残茬偏长风险;作业速度 4 km/h 工况虽在运动稳定性方面表现较好,但从藜草根茎切断充分性、破碎强度及最终综合作业效果来看,3 km/h 更具优势。结合后续多因素优化结果可知,作业速度 3 km/h 为较优作业速度。

3.3.2 耕作深度对破碎效果的影响

在作业速度 4 km/h、刀辊转速 280 r/min 条件下,不同耕深下旋耕刀受力分布如图 10 所示,随着耕深由 50 mm 增加至 70 mm,刀刃表面高应力区域面积逐渐扩大、颜色逐渐加深,表明高应力集中范围和应力水平同步增加,刀具受载水平呈逐步升高趋势。

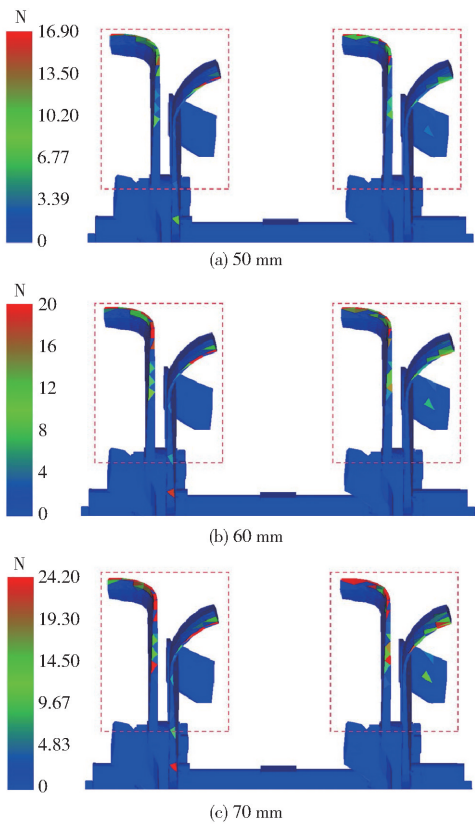


图 10 不同耕深下旋耕刀受力分布云图

Fig. 10 Force distribution diagrams of rotary tiller blade under different tilling depths operating forces of rotary tiller blade

由图 11 可知,不同耕深下旋耕刀受力过程可分为切入增载、主切削峰值和卸载衰减 3 个阶段,其中耕深 70 mm 工况下整体受力值及峰值均最大,60 mm 次之,50 mm 最小。表明随着耕深增加,刀具切削土壤量增大,翻土阻力和根土黏附阻力同步增加,导致作业载荷明显上升。

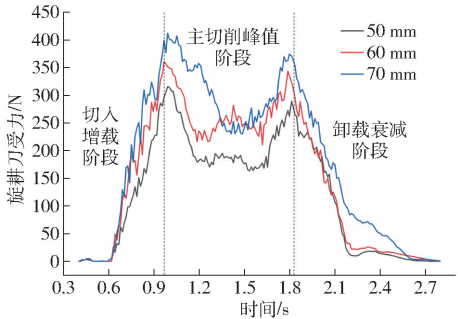


图 11 不同耕深下旋耕刀受力分布曲线

Fig. 11 Force distribution curves of rotary tiller blades under different tilling depths

综合分析可知,增大耕深有利于增强深层根系切断作用,但同时会显著提高刀具受载与作业能耗。当进入罩壳内土壤过多时,还可能形成缓冲层,削弱杂草与罩壳的碰撞破碎作用,降低二次破碎效率。因此,在满足除草要求的前提下,应合理控制耕深,以兼顾断根效果、碎土质量和作业能耗。

3.4 仿真正交试验与参数优化

3.4.1 试验方案设计与评价指标

为探究宏观作业参数对上述微观破碎规律的影响,并寻求最优作业组合,选取刀辊转速、作业速度和耕作深度为试验因素,通过 Design-Expert 13 软件设计三因素三水平 Box – Behnken 试验,试验因素编码如表 5 所示,以藜草破碎率、碎土率、耕作阻力为试验指标。

表 5 试验因素编码

Tab.5 Experimental factors and codings

编码	因素		
	刀辊转速/(r·min ⁻¹)	作业速度/(km·h ⁻¹)	耕深/mm
-1	250	3	50
0	280	4	60
1	310	5	70

藜草破碎率是指旋耕刀对杂草切碎清除能力。在离散元仿真中,杂草宏观破碎在微观层面表现为构成植株的颗粒间粘结键的断裂失效^[25]。通过统计作业区域内藜草模型中粘结键断裂数量计算,藜草破碎率 M 计算式为

$$M = \frac{N_1}{N_2} \times 100\%$$

(28)

式中 N_1 ——作业后藜草模型粘结键断裂数量
 N_2 ——作业前藜草模型粘结键总数

EDEM 仿真中碎土率可通过颗粒接触模型中粘结键断裂情况表示^[26]。统计作业区域内粘结键破碎状况,碎土率 S 计算式为

$$S = \frac{N_b}{N_i} \times 100\%$$

(29)

式中 N_b ——作业区耕后土壤粘结键断裂数
 N_i ——作业区耕前土壤颗粒总粘结键数量

耕作阻力可表征机具作业过程受载水平及能耗变化趋势。在仿真后处理中,提取旋耕刀在稳定作业阶段沿机具前进方向所受切削阻力作为耕作阻力评价价值。

3.4.2 回归模型构建与显著性分析

依据 Box – Behnken 试验方案进行离散元仿真,计算各组试验条件下藜草破碎率 M 、碎土率 S 及耕作阻力 F' 响应值,结果如表 6 所示,表中 x_1 、 x_2 、 x_3 为因素编码值。利用 Design-Expert 软件对试验数据进行多元回归拟合与方差分析(表 7),构建各响应指标关于刀辊转速、作业速度及耕作深度的二次多项式回归模型。

由表 7 可知,藜草破碎率回归模型拟合度极显著。刀辊转速 x_1 、作业速度 x_2 对 M 影响极显著,耕作深度 x_3 对 M 影响显著;在二次主效应中, x_1x_2 、

表 6 仿真试验结果

Tab.6 Simulation test results

序号	因素			藜草破碎率 $M/\%$	碎土率 $S/\%$	耕作阻力 F'/N
	x_1	x_2	x_3			
1	-1	-1	0	59.31	83.52	335.9
2	1	-1	0	67.70	86.82	288.4
3	-1	1	0	57.91	81.04	416.4
4	1	1	0	60.28	82.85	376.4
5	-1	0	-1	57.75	76.47	380.8
6	1	0	-1	62.72	74.22	341.8
7	-1	0	1	58.77	77.73	396.6
8	1	0	1	64.38	85.22	347.6
9	0	-1	-1	57.23	77.22	328.8
10	0	-1	-1	55.02	75.64	424.9
11	0	-1	1	61.08	84.13	352.4
12	0	1	1	54.08	79.53	424.2
13	0	0	0	65.35	87.45	357.2
14	0	0	0	65.95	86.54	360.9
15	0	0	0	63.87	86.76	355.3
16	0	0	0	64.50	87.13	352.4
17	0	0	0	64.66	87.82	353.5

x_2x_3 、 x_2^2 、 x_3^2 影响极显著,得到 M 回归方程为

$$M = 64.87 + 2.67x_1 - 2.25x_2 + 0.6987x_3 - 1.51x_1x_2 + 0.16x_1x_3 - 1.2x_2x_3 + 0.2432x_1^2 - 3.81x_2^2 - 4.2x_3^2$$

(30)

由表 7 可知,碎土率回归模型拟合度极显著。作业速度 x_2 、耕作深度 x_3 对 S 影响极显著。在二次主效应中, x_1x_3 、 x_1^2 、 x_2^2 、 x_3^2 为极显著, x_2x_3 为显著,得到 S 回归方程为

$$S = 87.14 + 1.29x_1 - 1.58x_2 + 2.88x_3 - 0.3725x_1x_2 + 2.43x_1x_3 - 0.755x_2x_3 - 2.15x_1^2 - 1.43x_2^2 - 6.58x_3^2$$

(31)

由表 7 可知,耕作阻力回归模型拟合度极显著。刀辊转速 x_1 、作业速度 x_2 和耕作深度 x_3 对 F' 影响极显著。在二次主效应中, x_2x_3 、 x_1^2 、 x_2^2 、 x_3^2 为极显著, x_1x_3 为较显著,得到耕作阻力 F' 回归方程为

$$F' = 355.86 - 21.94x_1 + 42.05x_2 + 5.56x_3 + 1.87x_1x_2 - 2.5x_1x_3 - 6.07x_2x_3 - 8.73x_1^2 + 7.14x_2^2 + 19.57x_3^2$$

(32)

由表 7 可知,刀辊转速对藜草破碎率和耕作阻力影响极显著。这与 3.3 节的草土复合体离散元模型破碎规律分析吻合:转速直接决定了旋耕刀切削时的冲击能量和应变率。高转速产生的瞬时冲击力远超藜草与土壤粘结键的强度阈值,并能提供足够的动能用于二次碰撞破碎,因此破碎率和碎土率均随转速增加而显著提升。破碎率受刀辊转速二次项的显著影响,其随转速变化存在非线性特征和适宜的转速区间。

表 7 回归模型方差分析

Tab. 7 Variance analysis of regression model						
指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
M	模型	259.55	9	28.84	77.42	<0.000 1 ***
	x_1	34.73	1	34.73	93.24	<0.000 1 ***
	x_2	49.70	1	49.70	133.42	<0.000 1 ***
	x_3	3.70	1	3.70	9.94	0.016 1 **
	x_1x_2	9.06	1	9.06	24.32	0.001 7 ***
	x_1x_3	0.10	1	0.10	0.28	0.616 2
	x_2x_3	5.74	1	5.74	15.40	0.005 7 ***
	x_1^2	0.25	1	0.25	0.67	0.440 4
	x_2^2	61.10	1	61.10	164.02	<0.000 1 ***
	x_3^2	74.42	1	74.42	199.80	<0.000 1 ***
	残差	2.61	7	0.37		
	失拟项	0.03	3	0.01	0.02	0.997 0
	总和	262.16	16			
S	模型	350.47	9	38.94	203.32	<0.000 1 ***
	x_1	0.09	1	0.09	0.45	0.525 4
	x_2	18.98	1	18.98	99.11	<0.000 1 ***
	x_3	89.32	1	89.32	466.39	<0.000 1 ***
	x_1x_2	0.56	1	0.56	2.90	0.132 5
	x_1x_3	23.72	1	23.72	123.83	<0.000 1 ***
	x_2x_3	2.28	1	2.28	11.90	0.010 7 **
	x_1^2	19.49	1	19.49	101.74	<0.000 1 ***
	x_2^2	8.63	1	8.63	45.03	0.000 3 ***
	x_3^2	182.23	1	182.23	951.48	<0.000 1 ***
	残差	1.34	7	0.19		
	失拟项	0.28	3	0.09	0.35	0.793 6
	总和	351.81	16			
F'	模型	20 546.97	9	2 283.00	352.47	<0.000 1 ***
	x_1	3 341.84	1	334 1.84	515.95	<0.000 1 ***
	x_2	11 920.29	1	11 920.29	1 840.38	<0.002 1 ***
	x_3	146.39	1	146.39	22.60	0.000 5 ***
	x_1x_2	14.06	1	14.06	2.17	0.184 1
	x_1x_3	25.00	1	25.00	3.86	0.090 2 *
	x_2x_3	147.62	1	147.62	22.79	0.002 0 ***
	x_1^2	320.90	1	320.90	49.54	0.000 2 ***
	x_2^2	214.95	1	214.95	33.19	0.000 7 ***
	x_3^2	1 612.57	1	1 612.57	248.97	<0.000 1 ***
	残差	45.34	7	6.48		
	失拟项	0.29	3	0.10	0.01	0.998 7
	总和	20 592.31	16			

注：*** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)；** 表示显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)；* 表示较显著 ($0.05 \leq P < 0.1$)。

3.4.3 多目标参数优化求解

为获得机具综合性能最优的作业参数组合,使用 Design-Expert 13 软件中优化功能,以藜草最大破碎率、最大碎土率和最小耕作阻力为优化目标,建立约束方程组求解作业指标最优条件下各影响因素的优化组合,约束条件及目标函数为

$$\begin{cases} \max M(x_1, x_2, x_3) \\ \max S(x_1, x_2, x_3) \\ \min F(x_1, x_2, x_3) \\ -1 \leq x_1 \leq 1 \\ -1 \leq x_2 \leq 1 \\ -1 \leq x_3 \leq 1 \end{cases} \quad (33)$$

通过求解得到理论较优参数组合为:刀辊转速 270.9 r/min、作业速度 3 km/h、耕深 70 mm。考虑到实际机具调节精度,参数取整为:刀辊转速 270 r/min、作业速度 3 km/h、耕深 70 mm。在此优化工况下,模型预测藜草破碎率为 62.4%、碎土率 83.2%,耕作阻力 347.7 N。该参数组合并非单一指标极值点,而是位于帕累托前沿上综合折中解,能够在藜草破碎率、碎土率和耕作阻力之间取得较好平衡。

4 田间试验

4.1 试验条件与方法

为验证中耕除草机工作性能,开展中耕除草试验。试验地位于新疆维吾尔自治区塔城市额敏县,土壤类型为棕钙土,试验前对 0~100 mm 土层土壤状态进行测定,测得土壤含水率 16.3%、容重 1.21~1.25 g/cm³、坚实度 2 867.7 kPa,土壤整体处于适宜中耕作业状态。试验田采用标准“52 cm+52 cm”套种模式,实测小麦平均株高为 68 cm,行间杂草平均株高约 35 cm,且杂草处于生长旺盛期。试验动力采用配备北斗导航系统的东风 1604-1 型拖拉机,田间试验过程如图 12 所示。



图 12 中耕除草机田间作业

Fig. 12 Field operation diagram of cultivator and weeder

试验仪器包括:容积 200 cm³环刀、量程 50 m 皮尺、量程 30 cm 钢尺、秒表、电子秤等。中耕除草机的运行参数基于前期仿真优化结果,设定中耕除草机作业参数为:刀辊转速 270 r/min、作业速度 3 km/h、耕深 70 mm。作业完成后测定作业前后除草与碎土效果。

在试验地采用五点取样法选取 5 个边长为 1 m 的正方形为测定区域,统计除草前后杂草数量计算除草率,同时统计因除草导致倒伏、茎秆损伤、根部外露或被刀具切伤的小麦植株数量计算伤苗率^[26]。除草率 C 和伤苗率 C_w 计算式为

$$C = \frac{T - I}{T} \times 100\%$$
 (34)

$$C_w = \frac{W_s}{W_t} \times 100\%$$
 (35)

式中 I ——作业后残存杂草数量,株
 T ——作业前杂草总株数,株
 W_s ——作业后受损小麦株数,株
 W_t ——测定区域内小麦总株数,株

在除草区域随机选取 10 块 0.5 m × 0.5 m 采样点取样^[26]。取样土块按照直径分小于等于 40 mm 和大于 40 mm 2 个等级,以直径小于等于 40 mm 土块占采样土壤总质量百分比计算碎土率,碎土率 C_s 计算式为

$$C_s = \frac{G_s}{G_s + G_l} \times 100\%$$
 (36)

式中 G_s ——单位面积内最长边小于等于 4 cm 土块质量,g
 G_l ——单位面积内最长边大于 4 cm 土块质量,g

在优化参数组合下测定机具实际作业耕深,作业后沿机具前进方向每隔 2 m 测定耕深,每个行程测点数不少于 20 个,并计算耕深稳定性系数^[27]。耕深稳定性系数 U_D 计算式为

$$U_D = \left(1 - \frac{S_D}{\bar{D}}\right) \times 100\%$$
 (37)

式中 S_D ——实测耕深标准差,mm
 $\bar{D}$ ——实测平均耕深,mm

4.2 试验结果与分析

田间试验结果表明,该中耕除草机能有效清除行间杂草,如图 13 所示,机具通过性良好,无明显缠草或壅土现象。在优化参数组合下,机具除草率、碎土率和小麦伤苗率分别为 95.3%、89.4% 和 4.23%,其中碎土率田间试验结果与仿真结果相对误差约为 7.5%。作业后,两侧小麦植株整体保持良好,未出现大面积倒伏、折断或根部外露现象,说明该机具在完成行间除草和碎土作业的同时,对

小麦植株扰动较小,能够满足“冬小麦 + ”套种模式下小麦灌浆期行间中耕除草、碎土及低损伤作业要求。



(a) 作业前 (b) 作业后

图 13 中耕除草机除草前后效果

Fig. 13 Weeding effects before and after using cultivator and weeder

耕深稳定性测试结果表明,优化参数组合下机具耕深稳定性系数为 91.6%,表明仿形机构能够较好地随地表起伏进行自适应调节,耕深波动较小。

5 结论

(1)设计了一种具有单体仿形功能的中耕除草机,通过对仿形机构和旋耕刀关键参数进行分析,明确了限深轮位置、仿形调节器压缩量及地表起伏对耕深稳定性的影响,为机具结构设计提供了依据。

(2)基于藜草茎秆与主根剪切试验,构建了藜草-土壤复合体离散元模型。仿真分析表明,作业速度、刀辊转速和耕深均显著影响藜草破碎效果及机具受载。低速作业有利于提高瞬时破碎强度,但速度波动较大;中等速度在破碎强度与运动稳定性之间匹配较优。刀辊转速优化应兼顾破碎效果与耕作阻力。耕深增大可提高断根能力,但会增加刀具载荷并降低二次破碎效率。

(3)通过 Box - Behnken 试验与多目标优化,确定机具最佳作业参数组合为刀辊转速 270 r/min、作业速度 3 km/h、耕深 70 mm。田间试验结果表明,在优化参数组合下,机具除草率、碎土率和小麦伤苗率分别为 95.3%、89.4% 和 4.23%,耕深稳定性系数为 91.6%,说明该机具能够满足套种模式下行间除草、碎土、低伤苗和耕深稳定作业要求。

参 考 文 献

[1] 唐敏. 新疆石河子棉田套种小茴香高产栽培关键技术试验分析[J]. 种子世界, 2025(9): 60 - 62.
Tang Min. Experimental analysis of key high-yield cultivation techniques for intercropping fennel in cotton fields in Shihezi, Xinjiang[J]. Seed World, 2025(9): 60 - 62. (in Chinese)

[2] 王龙, 谷泊萱, 胡灿, 等. 基于套种模式的气力集排式小麦播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 129 - 139.
Wang Long, Gu Boxuan, Hu Can, et al. Design and experiment of winter wheat pneumatic collection and discharge seeder based on intercropping mode[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 129 - 139. (in Chinese)

[3] 李科. 安阳县小麦和朝天椒立体套种高产高效栽培技术[J]. 基层农技推广, 2025, 13(7): 111 - 113.

[4] Xie Q, Song M, Wen T, et al. A hob-type smart weeding machine for use in wheat fields: towards a low power consumption and high-efficiency design[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227(P1): 109519.

[5] Tang Z, Xi X, Zhang B, et al. Design and experiment of an inter-row weeding machine applied in soybean and corn strip

- compound planting (SCSCP)[J]. *Agronomy*, 2024, 14(9): 2136.
- [6] 王金峰,翁武雄,鞠金艳,等.基于遥控转向的稻田行间除草机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 97–105.
Wang Jinfeng, Weng Wuxiong, Ju Jinyan, et al. Design and test of weeder between rows in rice field based on remote control steering[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(9): 97–105. (in Chinese)
- [7] 许静,刘宝伟,陈平录,等.油茶林立式螺旋松土除草机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(12): 79–87.
Xu Jing, Liu Baowei, Chen Pinglu, et al. Development and experiment of vertical spiral cutter for soil loosening and weeding in *Camellia oleifera* forest[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(12): 79–87. (in Chinese)
- [8] 曹成茂,向旺,罗坤,等.抛推组合式草土分离前胡除草机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(3): 106–114.
Cao Chengmao, Xiang Wang, Luo Kun, et al. Design and experiment of *Radix peucedani* weeding machine separating weeds and soil with combination of throwing and pushing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(3): 106–114. (in Chinese)
- [9] 丁力,袁业超,李源源,等.大豆行间驱拨组合式除草机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(9): 344–354.
Ding Li, Yuan Yechao, Li Yuanyuan, et al. Design and testing of combined soybean inter-row roundup weeder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(9): 344–354. (in Chinese)
- [10] Walunj A, Chen Y, Tian Y, et al. Modeling soil–plant–machine dynamics using discrete element method: a review[J]. *Agronomy*, 2023, 13(5): 1260.
- [11] Zou L, Yan D, Niu Z, et al. Parametric analysis and numerical optimization of spinach root vibration shovel cutting using discrete element method[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 212: 108138.
- [12] Du J, Heng Y, Zheng K, et al. Investigation of the burial and mixing performance of a rotary tiller using discrete element method[J]. *Soil & Tillage Research*, 2022, 220: 105349.
- [13] Huang X, Wang X, Wang Y, et al. Multi-objective optimization and experimental analysis of rotary tillage parameters for horticultural electric tractors[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025, 231: 109962.
- [14] 谢伟,彭磊,蒋蘋,等.收获期油菜茎秆双层粘结离散元模型建立与优化[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(5): 112–120.
Xie Wei, Peng Lei, Jiang Ping, et al. Discrete element model building and optimization of double-layer bonding of rape shoots stems at harvest stage[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(5): 112–120. (in Chinese)
- [15] 杜哲,李邓辉,李心平,等.茶茎秆离散元模型参数标定与试验[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(1): 311–320.
Du Zhe, Li Denghui, Li Xiping, et al. Calibration and experiment of discrete element model parameters for tea stem[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(1): 311–320. (in Chinese)
- [16] Zhang X, Yu S, Hu X, et al. Study on rotary tillage cutting simulations and energy consumption predictions of sandy ground soil in a Xinjiang cotton field[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 217: 108646.
- [17] Cheng J, Xia J, Zheng K, et al. Design and experimental of anti-adhesion rototiller based on staggered double-roller scraping[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2024, 17(4): 165–175.
- [18] Zhao Z, Wang D, Shang S, et al. Design and test of a dual-axis layered rotary tillage stubble exterminator in saline-alkali land based on discrete elements[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2024, 17(5): 163–175.
- [19] 钱君,马少春,徐杨,等.滑剪组合式甘蔗根切装置的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(10): 37–47.
Qian Jun, Ma Shaochun, Xu Yang, et al. Design and test of sliding shear combined sugarcane basecutter[J]. *Transactions of the CSAE*, 2023, 39(10): 37–47. (in Chinese)
- [20] 刘文广,郝晋璋,赵永来,等.耕整播一体机鲨鱼背鳍仿生刀片设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(16): 35–45.
Liu Wenguang, Hao Jinzhang, Zhao Yonglai, et al. Design and test of shark dorsal fin bionic blade of tillage and seeding machine[J]. *Transactions of the CSAE*, 2025, 41(16): 35–45. (in Chinese)
- [21] Cao Qingqiu, Zhang Shengwei, Li Tao, et al. Discrete element modelling and mechanical properties and cutting experiments of *Caragana korshinskii* Kom. stems[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1457243.
- [22] 李清超,郑炫,刘进宝,等.新疆农田粉土离散元仿真参数标定[J]. *新疆农业科学*, 2022, 59(8): 2014–2024.
Li Qingchao, Zheng Xuan, Liu Jinbao, et al. Parameter calibration of discrete element simulation of farmland silt in Xinjiang[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2022, 59(8): 2014–2024. (in Chinese)
- [23] 叶大鹏,青家兴,林志强,等.类芦茎秆离散元模型建立与参数标定[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(7): 139–149.
Ye Dapeng, Qing Jiaxing, Lin Zhiqiang, et al. Establishment and parameter calibration of discrete element model for *Neyraudia reynaudiana* stalk[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(7): 139–149. (in Chinese)
- [24] 张学宁,尤泳,王德成,等.基于离散元法的板结草地破土切根刀优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(11): 176–187.
Zhang Xuening, You Yong, Wang Decheng, et al. Design and experiment of soil-breaking and root-cutting cutter based on discrete element method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(11): 176–187. (in Chinese)
- [25] 周俊,孙文涛,梁子安.收获期菊芋根-块茎离散元柔性模型研究[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(10): 124–132.
Zhou Jun, Sun Wentao, Liang Zi'an. Construction of discrete element flexible model for jerusalem artichoke root–tuber at harvest stage[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(10): 124–132. (in Chinese)
- [26] 代斌豪,赵建国,郝建军,等.玉米立式双轴对旋除草机结构设计与试验[J]. *中国农业大学学报*, 2025, 30(8): 185–197.
Dai Binhao, Zhao Jianguo, Hao Jianjun, et al. Structural design and test of maize vertical double-shaft counter rotating weeding machine[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(8): 185–197. (in Chinese)
- [27] Liu G, Zheng K, Xia J, et al. Research on an intelligent vibration detachment system for rotary tiller based on soil surface roughness dynamic characteristics[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 224: 109214.