



代斌豪,赵建国,郝建军,赵小川,马志凯,吴运涛,汤洪远. 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(08): 185-197.
DAI Binhao, ZHAO Jianguo, HAO Jianjun, ZHAO Xiaochuan, MA Zhikai, WU Yuntao, TANG Hongyuan. Structural design and test of maize vertical double-shaft counter rotating weeding machine[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(08): 185-197.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.08.16

玉米立式双轴对旋除草机结构设计与试验

代斌豪¹ 赵建国^{1,2*} 郝建军^{1,2} 赵小川¹ 马志凯^{1,2} 吴运涛³ 汤洪远⁴

(1. 河北农业大学 机电工程学院, 河北 保定 071001;

2. 河北省农业机械作业刀具重点实验室, 河北 定州 073000;

3. 河北农哈哈机械集团有限公司, 石家庄 052560;

4. 高阳县农业农村局, 河北 保定 071500)

摘要 针对玉米大田机械除草机除草效率低、伤苗率高等问题,设计一种立式双轴对旋除草机。对玉米大田土壤及常见杂草的物理特性进行测定分析,利用EDEM软件建立根土复合体离散元模型;对除草刀与除草过程中土壤和草根的互作关系进行仿真,评估不同参数对除草刀除草功耗和除草性能的影响;以斜切角、端切角和刀片数量为影响因素,除草扭矩和碎土率为响应值,通过预试验和单因素试验确定各因素对响应值的影响规律,基于前期仿真试验结果开展多因素仿真试验并基于非支配排序遗传算法(NSGA-II)对除草刀进行优化,得出最佳除草刀参数;通过田间试验验证除草刀在实际作业中的可靠性。优化得到除草刀最佳参数组合为,斜切角10°、端切角55°、刀片数量3片;以最佳参数组合进行田间试验验证,除草率为94.67%、伤苗率3.74%、碎土率84%,除草机作业期间运行稳定,具有良好的除草效果。

关键词 立式除草机; 除草刀; 根土复合体; 除草率

中图分类号 S224.1

文章编号 1007-4333(2025)08-0185-13

文献标志码 A

Structural design and test of maize vertical double-shaft counter rotating weeding machine

DAI Binhao¹, ZHAO Jianguo^{1,2*}, HAO Jianjun^{1,2}, ZHAO Xiaochuan¹, MA Zhikai^{1,2},
WU Yuntao³, TANG Hongyuan⁴

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China;

2. Hebei Provincial Key Laboratory of Agricultural Machinery Operational Cutting Tools, Dingzhou 073000, China;

3. Hebei Nonghaha Machinery Group Co., Ltd., Shijiazhuang 052560, China;

4. Gaoyang County Agriculture and Rural Bureau, Baoding 071500, China)

Abstract To address the issues of low weeding efficiency and high seedling damage rates of maize field conventional mechanical weeding machines, a vertical double-shaft counter-rotating weeding machine was designed. The physical properties of maize field soil and common weeds were measured and analyzed, and the root-soil composite discrete element model was established using EDEM software. The interaction between the weeding knife and the soil and weed roots during the weeding process was simulated to evaluate the effects of different parameters on the power consumption and performance of the weeding knife. Using blade inclination angle, end face inclination angle, and the number of blades as influencing factors and weeding torque and soil crushing rate as response variables. Pre-experiments and single-factor experiments were conducted to

收稿日期: 2024-10-17

基金项目: 河北省现代农业产业技术体系创新团队建设(HBCT2024030207); 河北省农机新机具新技术研发项目(202310)

第一作者: 代斌豪(ORCID: 0009-0006-0261-3777), 硕士研究生, E-mail: daibinhao5@163.com

通讯作者: 赵建国(ORCID: 0009-0001-2527-5591), 教授, 主要从事耕整地机械装备设计及理论研究, E-mail: zjg790710@126.com

determine the influence of each factor on the response variables. Based on the results of prior simulation experiments, multi-factor simulation experiments were carried out, and the weeding knife was optimized using the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) to determine the optimal parameters of the weeding knife. Field experiments were conducted to verify the reliability of the weeding knife during actual operations. The optimal parameter combination for the weeding knife, obtained through optimization, was a blade inclination angle of 10°, an end face inclination angle of 55°, and 3 blades. The results of field trials conducted with the optimal parameter combination showed that the weeding rate was 94.67%, the seedling injury was 3.74%, and the soil crushing rate of 84%, respectively. In conclusion, the weeding machine operated stably during the process and exhibited good weeding performance.

Keywords vertical weeding machine; weeding knife; root soil composite; weeding rate

玉米是我国重要的粮食和饲料作物,但玉米田间杂草繁生问题严重影响了玉米产量^[1-2]。机械除草是一种高效环保的除草方式,能有效清除杂草、疏松土壤,避免化学除草剂的污染。

目前我国玉米大田机械除草机形式多样,主要有铲式除草机、梳齿式除草机、旋转锄式除草机、旋转爪式松土除草机和旋耕式除草机等。但玉米大田除草机在应用中存在能耗高、除草率低和伤苗率高等问题^[3-4]。现有研究对除草机关键部件进行了深入研究:王文明等^[5]利用振动减阻原理,对碎土刀切削土壤及旋转单体减阻机理进行分析,设计振动式旋转玉米除草机,田间试验表明,其作业功耗较传统机型降低32%;韩豹等^[6-8]设计了株间梳齿式玉米除草机,通过梳齿盘上的除草梳齿旋转除草,可在降低除草阻力的同时将苗带表层杂草有效去除;曹成茂等^[9]设计了抛推组合式草土分离除草机,通过除草轮主动入土,切碎杂草并向后抛出,同时推动除草机前进快速;杜伟等^[10]设计了仿生除草机,其除草轮以栉孔扇贝瓣为仿生原型,建立了土壤-仿生除草轮有限元模型仿真优化除草轮,有效地降低了除草机作业阻力;已有研究还利用离散

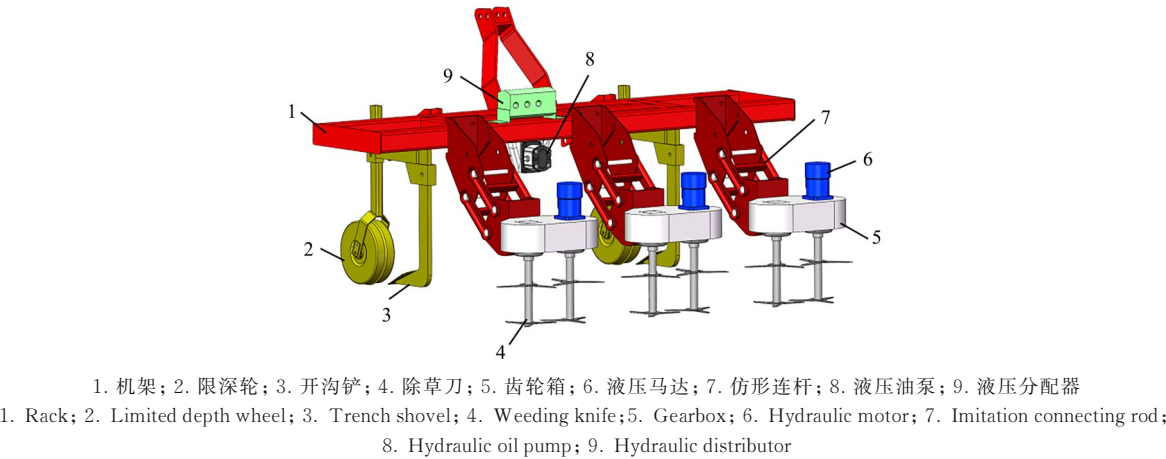
元法建立土壤离散元模型,探究刀具与土壤的相互作用,为优化刀具提供了重要依据^[11-13]。以上研究在提高除草效率和刀具优化方面取得显著进展,但对复杂土壤环境下根土复合体建模以及除草刀在根土复合体中除草过程的仿真仍显不足,除草能耗亦存在进一步下降空间。

为提升玉米大田除草机的除草质量,降低除草阻力,本研究拟针对除草刀运动过程进行仿真分析,采用预试验和单因素试验研究斜切角、端切角和刀片数对除草扭矩和碎土率的影响,确定最佳参数组合,并进行田间试验验证,以期为玉米大田立式双轴对旋除草机设计提供参考。

1 除草机结构与除草刀参数设计

1.1 结构及工作原理

本研究设计的立式双轴对旋除草机主要由机架、限深轮、液压油泵、液压马达、除草刀等组成(图1),工作时,拖拉机后输出轴带动液压油泵工作,提供动力输出给液压马达带动2把除草刀同时反向旋转,进行除草作业。



1. 机架; 2. 限深轮; 3. 开沟铲; 4. 除草刀; 5. 齿轮箱; 6. 液压马达; 7. 仿形连杆; 8. 液压油泵; 9. 液压分配器
1. Rack; 2. Limited depth wheel; 3. Trench shovel; 4. Weeding knife; 5. Gearbox; 6. Hydraulic motor; 7. Imitation connecting rod;
8. Hydraulic oil pump; 9. Hydraulic distributor

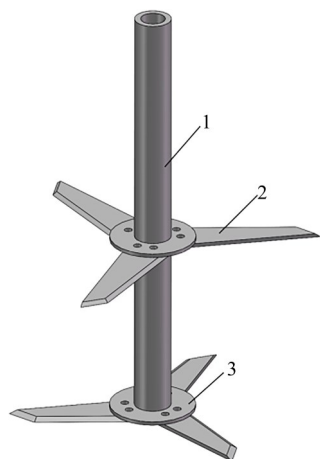
图1 立式双轴对旋除草机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the vertical double-shaft counter-rotating weeding machine

1.2 除草刀设计

1.2.1 除草刀结构及参数

除草刀主要由刀轴、刀盘和刀片组成(图2)。刀盘设计为上下2层,间距100 mm,并设置60°偏移。双层刀片能使除草刀在土上土下同时切割粉碎杂草和根土复合体,减少单层刀片压力,提高除草和碎土效果。依据本研究前期田间测量,玉米高度约为299 mm,故刀轴长度设计为350 mm避免伤苗;结合加工水平和强度要求设计刀轴外径为20 mm,内径14 mm,刀片厚度3 mm。因65Mn钢具有强度高、硬度高、淬透性好等优点,被广泛应用于农业机械等与土壤沙石接触的耐磨关键零部件中^[14],故除草刀材料采用65Mn钢。



1. 刀轴; 2. 刀片; 3. 刀盘
1. Knife shaft; 2. Blade; 3. Knife disc

图2 除草刀结构图

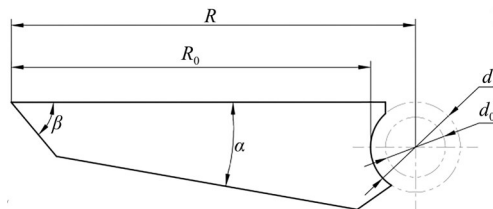
Fig.2 Structure diagram of weeding knife

依据玉米行间除草农艺要求,除草刀刀片长度 R_0 为:

$$R_0 = \frac{(L_0 - B)/2 - d}{2} \quad (1)$$

式中: L_0 为玉米行距,取600 mm; B 为玉米根系横向宽度,取145 mm; d 为轴外径。由式(1)计算得 $R_0=105$ mm。

斜切角 α 为除草刀刀刃与刀背的最小夹角(图3), α 的大小直接影响除草刀切土阻力与除草效果,基于本研究前期预试验结果,设定 α 为2°~10°;端切角 β 为除草刀刀片末端与刀背所夹角度, β 的大小影响刀的阻力和抛土性能,进而影响除草刀的除草阻力和培土性能,设定 β 为30°~70°。



R , 刀片回转半径; R_0 , 刀片长度; α , 斜切角; β , 端切角; d , 刀轴外径; d_0 , 刀轴内径。

R is the radius of rotation of the blade; R_0 is the length of the blade; α is the oblique angle; β is the end tangent angle; d is the outer diameter of the shaft; d_0 is the inner diameter of the shaft.

图3 除草刀片结构图

Fig.3 Structure diagram of weeding knife

1.2.2 除草刀刃口角

为得到除草刀刃口角的最佳参数,对刀片进行受力分析(图4),可得:

$$F_z = F_{N1} \sin \delta + (F_{f1} \cos \delta + F_{f2} + F_{f3}) + (F_{c1} \cos \delta + F_{c2} + F_{c3}) + F_j + c \quad (2)$$

其中:

$$F_{Ni} = U_i A_i$$

$$F_{fi} = \mu F_{Ni}$$

$$F_{f3} = F_{f2} + F_{f1} \cos \delta$$

式中: F_z 为除草刀剪切力,N; $F_{Ni}(i=1, 2, 3)$ 为除草刀所受的土壤法向力,N; U_i 为除草刀单位面积压力,Pa; A_i 为土壤与除草刀接触面积,m²; F_{fi} 为除草刀所受的土壤摩擦力,N; μ 为土壤与除草刀之间的摩擦因数; δ 为除草刀刃口角,(°); F_c 为除草刀表面所受的土壤粘聚力,N; F_j 为草根剪切阻力,N; c 为土壤粘聚力,kPa。

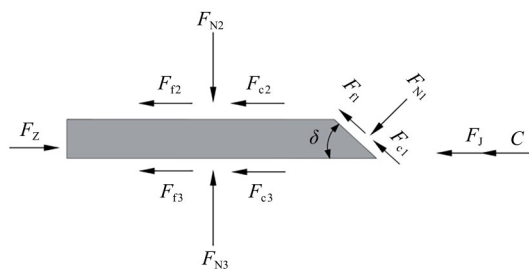


图4 除草刀片受力分析

Fig.4 Force analysis of weeding knife

计算得:

$$\delta = \arcsin \sqrt[3]{\frac{\mu P_i A_i}{F_{c1} + F_{c2}}} \quad (3)$$

设定 $\mu=0.17$, $F_{c1}=F_{c2}=2.6$ N^[15],带入式(3)计算得除草刀刃口角的理论最佳范围为35.5°~52.5°。

刃口角过大会增大土壤阻力,降低除草能力,过小会导致刃口易磨损,较优的刃口角范围为 $40^\circ \sim 45^\circ$ ^[16-17],为平衡除草刀工作阻力与耐用性,选择刃口角为 45° ^[18]。

1.3 除草刀运动分析

除草刀刀刃入土稳定切削时,切向阻力 F 包括切削土壤产生的土壤扰动阻力、除草刀与土壤接触的摩擦阻力以及抛掷土壤产生的动态切削阻力。由于除草刀与土壤的摩擦阻力在整个切削阻力中所占比例很小,可忽略不计。因此在分析时只需要考虑动态切削阻力和土壤扰动阻力^[19]。

单把除草刀片在土壤中稳定工作时的切向阻力为:

$$F = F_a + F_b \quad (4)$$

式中: F_a 和 F_b 为单把除草刀的动态切削阻力和土壤扰动阻力,N。

动态切削阻力 F_a 是除草刀在稳定切削根土复合体所产生的阻力,动态切削比 ζ_F 与切削速度 v 呈线性关系,即:

$$\zeta_F = \zeta_0(1 + k_v v) \quad (5)$$

式中: ζ_0 为静态切削比阻系数; k_v 为土壤切削速度 v 的影响系数。

静态切削比阻 ζ_0 是除草刀以较慢速度切削根土复合体所产生的阻力。静态切削比阻与切削角 η 关系为:

$$\zeta_0 = \zeta(\eta_0) + \zeta_\eta(\eta - \eta_0) \quad (6)$$

式中: η_0 为除草刀切削初始角, $^\circ$; $\zeta(\eta_0)$ 为切削角 η_0 对应的静态切削比阻; ζ_η 为切削角 η 的影响系数。

除草刀切削深度为 p 、厚度为 e 的土壤时产生的动态切削阻力 F_a 为:

$$F_a = \zeta_0(1 + k_v v) p e_\theta \quad (7)$$

式中: e_θ 为除草刀在角 θ 时对应的切削厚度,mm。

土壤扰动阻力 F_b 与切削速度 v 的平方成正比:

$$F_b = p t \sin \eta \frac{\varepsilon}{g} v^2 \left(1 - \frac{e_\theta}{e_{\theta_0}}\right) \quad (8)$$

式中: t 为除草刀工作部分的厚度,mm; ε 为土壤容重, g/cm^3 ; e_{θ_0} 为除草刀在角 θ_0 对应的切削厚度,mm。

联立可得除草刀的切向阻力:

$$F = \zeta_0(1 + k_v v) p e_\theta + p t \sin \eta \frac{\varepsilon}{g} v^2 \left(1 - \frac{e_\theta}{e_{\theta_0}}\right) \quad (9)$$

2 根土复合体离散元模型构建

2.1 根系模型

本研究对田间杂草种类和数量进行统计,结果显示牛筋草占杂草总量的33%,分布最为广泛,同时鉴于牛筋草根系平均直径较粗,其剪切力较马唐高30%,较稗草高25%^[20],故选用牛筋草根作为试验对象。采用WDW-5E型万能试验机对直径约8 mm的牛筋草根进行剪切试验,设定剪切速度为120 mm/min,数据采集速率2个/s。试验结果(图5)表明剪切力在位移为9.87 mm时达到最大值62.31 N。

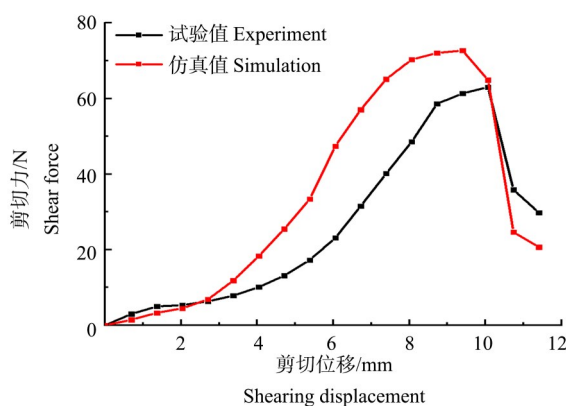
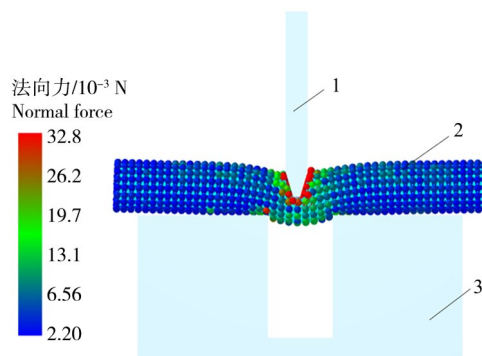


图5 牛筋草根剪切受力曲线

Fig. 5 Shear force curve of eleusine indica root

使用EDEM软件构建离散元柔性牛筋草根系模型进行仿真剪切试验(图6)。接触模型是离散元法的重要基础,本质是准静态下颗粒固体的接触力学弹塑性分析^[21],本研究选用Hertz-Mindlin with



1. 切刀; 2. 草根离散元模型; 3. 底座。

1. Cutting tool; 2. Discrete element model of weed root; 3. Base.

图6 牛筋草根系模型仿真剪切试验

Fig. 6 Simulation shear test of eleusine indica root model

bonding 接触模型,通过粘结键将颗粒粘结在一起(图 7),使颗粒能够承受一定的力并传递作用力和力矩,从而较好地模拟物体的变形和破碎^[22]。

两颗粒粘结前,其接触模型仍为标准的 Hertz-Mindlin(no slip)模型,粘结后颗粒的法向、切向接触力 F_n 、 F_t 和法向、切向力矩 M_n 、 M_t 随时间步从 0 开始增大^[23],计算公式为:

$$\begin{cases} \delta F_n = -v_n S_n A \delta_t \\ \delta F_t = -v_t S_t A \delta_t \\ \delta M_n = -\omega_n S_n J \delta_t \\ \delta M_t = -\omega_t S_t \frac{J}{2} \delta_t \end{cases} \quad (10)$$

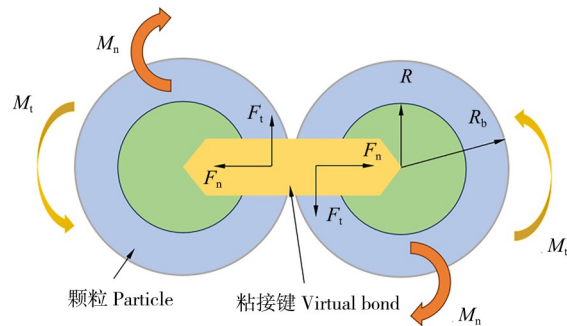
式中: v_n 、 v_t 分别为颗粒运动速度的法向、切向分量; S_n 、 S_t 为粘结颗粒法向、切向刚度; A 为 Bond 键接触区域面积; δ_t 为时间步长; ω_n 、 ω_t 为颗粒角速度的法向、切向分量; J 为颗粒的截面极惯性矩。

当外界施加的作用力超过设定的临界值时,粘结键被破坏。法向和切向的临界应力定义为:

$$\begin{cases} \sigma_{\max} < \frac{-F_n}{A} + \frac{2M_t}{J} R_b \\ \tau_{\max} < \frac{-F_t}{A} + \frac{M_n}{J} R_b \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\sigma_{\max}$ 为法向临界应力; $\tau_{\max}$ 为切向临界应力。

根系模型参数主要有材料参数和接触参数 2 部分。材料参数设置为:根系颗粒间及根系与除草刀的恢复系数均为 0.4,根系颗粒间动、静摩擦因数分别为 0.15 和 0.4,根系与除草刀动、静摩擦因数分别



R 为颗粒半径; R_b 为粘结半径; F_n 为法向接触力; F_t 为切向接触力; M_n 为颗粒法向力矩; M_t 为颗粒切向力矩。

R is the particle radius; R_b is the bonding radius; F_n is the normal contact force; F_t is the tangential contact force; M_n is the normal moment of the particle; M_t is the tangential moment of the particles.

图 7 Hertz-Mindlin with bonding 接触模型及其粘结键

Fig.7 Hertz-Mindlin with bonding contact model and its bonding bond

为 0.01 和 0.7^[24]。Hertz-Mindlin with bonding 接触参数包括:法向粘结刚度 S_n 、切向粘结刚度 S_t 、法向临界应力 $\sigma_{\max}$ 、切向临界应力 $\tau_{\max}$ 和粘结半径 R_b ,前 4 个参数反映颗粒间粘结力大小,粘结半径表示颗粒含水率高^[22],模型所有接触参数见表 1。根系模型仿真剪切受力曲线对比实际剪切曲线可知,剪切力随位移增加而逐渐增大,达到峰值后,根系断裂导致剪切力迅速下降,且两者的趋势一致。实际剪切力峰值为 62.31 N,仿真剪切力峰值为 71.04 N (图 5),相对误差为 12.28%,这验证了根系仿真模型的可靠性。

表 1 牛筋草根系离散元模型接触参数

Table1 Contact parameters of root system discrete element model

参数 Parameter	数值 Value	参数 Parameter	数值 Value
根系密度/(kg/m ³) Root density	107.6	根系与切刀间恢复系数 Recovery coefficient between root and weeding knife	0.4
根系剪切模量/MPa Shear modulus of root	8	根系与切刀间动摩擦因数 Dynamic friction coefficient between root and weeding knife	0.01
根系泊松比 Poisson ratio of root	0.25	根系与切刀间静摩擦因数 Static friction coefficient between root and weeding knife	0.7
根系间碰撞恢复系数 Root recovery coefficient	0.4	根系颗粒粘结刚度/(N/m ³) Root particle adhesion stiffness	1.65×10^7
根系间动摩擦因数 Dynamic friction coefficient between root	0.15	根系颗粒临界应力/Pa Critical stress of root particles	1×10^7
根系间静摩擦因数 Static friction coefficient between root	0.4	根系颗粒粘结半径/mm Adhesion radius of root particles	1.2

2.2 根土复合体模型

2.2.1 根土复合体剪切试验

在玉米3~5叶期大田中随机选取状态良好且根部直径约6~8 mm的牛筋草,在根系结点处将其剪断,使用200 cm³环刀取土器以根为中心取出根土复合体并使用保鲜膜密封,重复取样5次。使用ZJ型应变控制式直剪仪(南京土壤仪器厂)对根土复合体进行直剪试验获得最大剪切力,设置竖向压力50 kPa、剪切速率0.8 mm/min,重复试验5次^[25]。试验结果表明根土复合体最大剪切力平均值为120.5 N。

2.2.2 根土复合体离散元建模

将本研究建立的根系模型导入并排列于土槽中,利用颗粒工厂生成土壤颗粒填充土槽并使用bonding键将根系颗粒与土壤颗粒黏结为整体,形成根土复合体离散元模型。根据实际直剪试验结果进行仿真直剪确定模型参数,经过多次仿真测试最终确定根系与土壤颗粒间接触参数(表2)^[26-27]。根土复合体模型仿真直剪试验最大剪切力为118.7 N,与实际直剪试验最大剪切力相对误差为1.49%,表明根土复合体模型能较准确反映实际状况。

表2 根土复合体离散元模型接触参数
Table2 Contact parameters of root soil composite discrete element model.

参数 Parameter	数值 Value	参数 Parameter	数值 Value
土壤颗粒泊松比 Poisson's ratio of soil particles	0.3	土壤与除草刀的静摩擦因数 Static friction coefficient between soil and the weeding knife	0.313
土壤密度/(kg/m ³) Density of soil	2 600	土壤与除草刀动摩擦因数 Dynamic friction coefficient between soil and the weeding knife	0.17
土壤颗粒剪切模量/Pa Shear modulus of soil particles	1×10 ⁶	根系与土壤颗粒间的动摩擦因数 Dynamic friction coefficient between root and soil particles	0.3
除草刀泊松比 Poisson's ratio of the weeding knife	0.288	根系与土壤颗粒间的静摩擦因数 Static friction coefficient between root and soil particles	0.7
除草刀密度/(kg/m ³) Density of the weeding knife	7 850	根系与土壤颗粒间的恢复系数 Restitution coefficient between root and soil particles	0.6
除草刀剪切模量/Pa Shear modulus of the weeding knife	7.9×10 ¹⁰	土壤颗粒间临界法向应力/Pa Critical normal stress between soil particles	1×10 ⁵
土壤颗粒间的恢复系数 Restitution coefficient between soil particles	0.6	土壤颗粒间临界切向应力/Pa Critical tangential stress between soil particles	2×10 ⁵
土壤颗粒间的静摩擦因数 Static friction coefficient between soil particles	0.33	土壤颗粒间法向刚度/(N/m ³) Normal stiffness of soil particles	5×10 ⁵
土壤颗粒间的动摩擦因数 Dynamic friction coefficient between soil particles	0.14	土壤颗粒间的切向刚度/(N/m ³) Tangential stiffness between soil particles	2×10 ⁶
土壤颗粒与除草刀间的恢复系数 Restitution coefficient between soil particles and the weeding knife	0.6	土壤颗粒粘结半径/mm Adhesion radius of soil particles	2.2

3 除草刀仿真优化

3.1 仿真除草试验

3.1.1 除草过程

结合除草刀实际尺寸和工作情况,将除草刀导

入根土复合体土槽模型并设置运动,研究除草刀在工作过程中与根、土相互作用的机理。根据预试验结果及农艺要求,设置除草刀入土深度30 mm,行进速度1 m/s。除草刀仿真除草过程见图8,不同时刻草的破碎状态见图9。

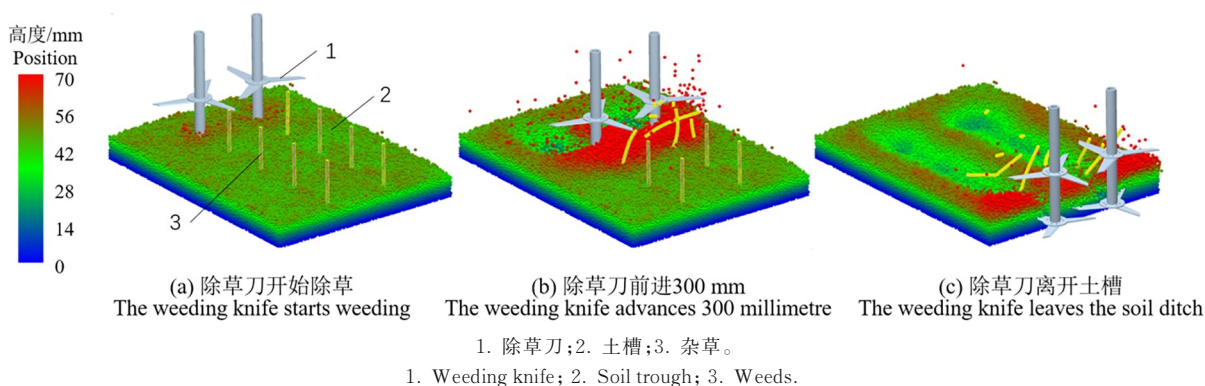
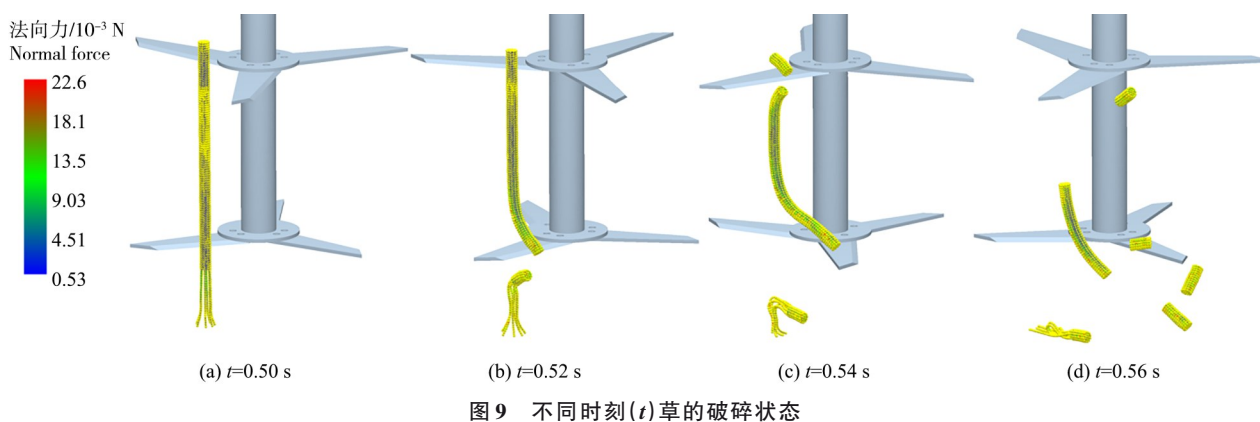


图 8 除草刀仿真除草过程

Fig. 8 Simulating the weeding process with a weeding knife

图 9 不同时刻(t)草的破碎状态Fig. 9 The broken state of grass at different times (t)

仿真试验结果表明,除草刀使土壤颗粒发生显著扰动,部分土壤沿除草刀旋转方向向两侧运动,对周围土壤产生挤压作用,被扫掠的土壤颗粒向两侧堆积,表明除草刀培土效果显著。此外,牛筋草根被切碎并翻出地表,表明除草刀除草效果良好。

3.1.2 试验指标

1) 除草扭矩。除草扭矩是指除草刀在工作过程中所需旋转力矩。利用 EDEM 软件测定除草刀不同工作时刻的扭矩分布,经过数据整理与分析可得出除草功耗,两者关系为:

$$P_1 = \frac{nM}{9550} \quad (12)$$

式中: P_1 为除草刀功耗, kW; n 为除草刀转速, r/min; M 为除草扭矩, N·m。

2) 碎土率。碎土率是指除草刀对土壤和杂草根系的切碎效果,能直观反映除草刀的切削性能。碎土率越高,根土破碎程度越大,不仅有助于除草,还能提高土壤蓬松度和透气性,从而促进作物生长。仿真模型的碎土率可通过颗粒接触模型中的粘结键断裂情况表示^[28]。利用 EDEM 中 Grid 网格

功能,在除草刀稳定工作区域的中心设置尺寸为 $267 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 的网格求解器,以统计区域内粘结键的破碎状况计算其碎土率(K),计算公式为:

$$K = \frac{B_1}{B} \times 100\% \quad (13)$$

式中: B_1 为网格区域内断裂粘结键数; B 为网格区域内粘结键总数。

3.2 单因素仿真试验

3.2.1 试验设计

除草刀的斜切角、端切角和刀片数是影响除草刀作业性能的关键因素,直接关系到除草刀除草效果与除草功耗。斜切角决定除草刀与土壤和杂草根系的接触角度,从而影响切土阻力和除草效果;端切角影响除草刀抛掷土草的角度,直接影响除草阻力与培土性能;刀片数则直接影响除草刀作业效率与除草能耗。因此合理设计这些参数能有效优化除草刀性能,提高作业效果,降低能耗。使用单因素试验探究除草刀斜切角(A)、端切角(B)和刀片数(C)对除草刀扭矩(Y_1)和碎土率(Y_2)的影响规律,各因素水平见表 3。

表3 除草刀参数单因素试验因素与水平

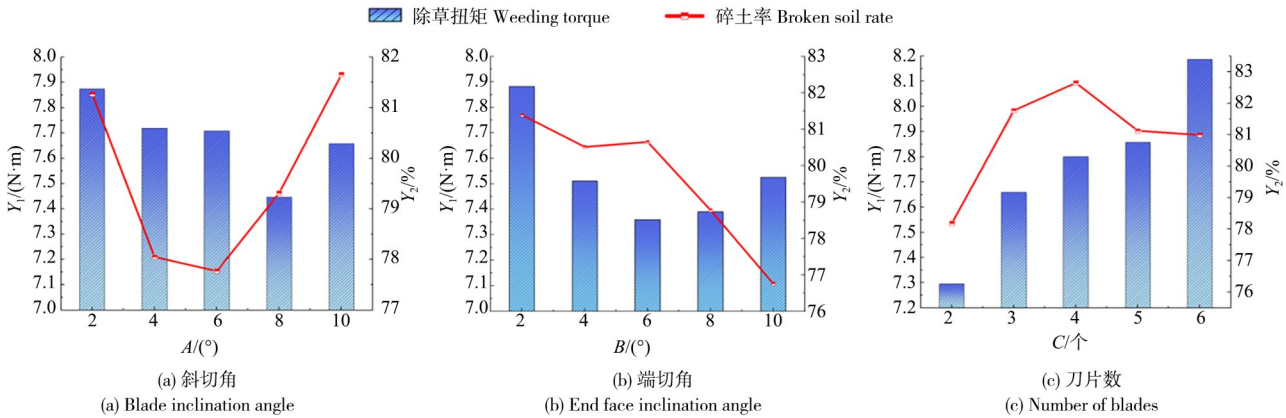
Table 3 Single factor experimental factors and levels of weeding knife parameters

水平 Level	因素 Factor		
	斜切角 $A/(^{\circ})$	端切角 $B/(^{\circ})$	刀片数 $C/\text{个}$
	Blade inclination angle	End face inclination angle	Number of blades
1	2	30	2
2	4	40	3
3	6	50	4
4	8	60	5
5	10	70	6

3.2.2 各因素对除草扭矩和碎土率的影响

斜切角、端切角和刀片数影响除草扭矩和碎土率的仿真试验结果见图10。随着斜切角的增大,除草扭矩先减小后随斜切角增大,斜切角为8°时达到最低值7.45 N·m;碎土率也随斜切角先减小后增大,斜切角为6°时达到最低值77.6%。随着端切角增大,除草扭矩

先减小,50°时达到最低值7.36 N·m,后随端切角增大而增大;碎土率随端切角增大而减小,最大值为81.4%。随着刀片数增加,除草扭矩从7.29 N·m不断增大,而碎土率在刀片数为4片时达到最大值。单因素试验结果表明,斜切角为6°~10°,端切角40°~60°,刀片数3~5片时,除草刀可实现较低扭矩和较高碎土率。



A为斜切角, (°); B为端切角, (°); C为刀片数, 个。图11、图12同。
A is the blade inclination angle (°); B is the end face inclination angle (°); C is the number of blades. Figs 11 and 12 are the same.

图10 斜切角、端切角和刀片数影响除草扭矩(Y_1)和碎土率(Y_2)的仿真试验结果

Fig. 10 Simulation test results of the effects of blade inclination angle, end face inclination angle and number of blades on weeding torque (Y_1) and soil crushing rate (Y_2)

3.3 基于多目标优化算法的除草刀参数优化

3.3.1 响应面法方差分析

为进一步研究斜切角、端切角、刀片数对除草扭矩和碎土率的影响,基于前期预试验和单因素试验确定的设计参数,设计二次回归正交旋转组合试验,试验方案和试验结果见表4和表5。

对试验结果进行方差分析,结果见表6。可知:除草扭矩回归模型 $P<0.01$,表明模型评价指标拟合模型极显著;多元系数 R^2 和校正多元系数Adj R^2 为0.989

和0.974,表明模型的相关性较好可靠度高;信噪比为34.739,表明模型有较高的准确性与可信度;失拟项 $P=0.131$,表明模型拟合精度较高; A 、 B 、 C 、 AC 、 AB 、 BC 、 A^2 、 B^2 、 C^2 对扭矩 Y_1 的影响显著($P<0.05$)。试验指标与试验因素间存在明显的二次关系,分析显示结果合理。碎土率回归模型 $P<0.01$,表明模型评价指标拟合模型极显著;多元系数 R^2 和校正多元系数Adj R^2 为0.995和0.989,表明模型的相关性较好可靠度高;信噪比为45.533,表明模型有较高的准确性与

表 4 除草刀参数试验因素与水平

Table 4 Variable coding for experimental design of weeding blade parameters

水平 Level	因素 Factor		
	斜切角 $A /(^{\circ})$	端切角 $B /(^{\circ})$	刀片数 $C /$ 个
	Blade inclination angle	End face inclination angle	Number of blades
−1	6	40	3
0	8	50	4
1	10	60	5

表 5 除草刀参数试验方案与结果

Table 5 Design scheme and results of weeding knife parameter experiment

编号 Number	因素水平 Factor level			指标 Index		编号 Number	因素水平 Factor level			指标 Index	
	A	B	C	$Y_1/(\text{N}\cdot\text{m})$	$Y_2/\%$		A	B	C	$Y_1/(\text{N}\cdot\text{m})$	$Y_2/\%$
1	1	1	0	7.73	88.75	10	0	−1	−1	7.75	85.84
2	1	1	0	7.72	84.02	11	1	−1	0	7.7	85.79
3	0	0	0	7.77	85.72	12	−1	−1	0	7.42	84.05
4	−1	0	1	7.53	82.78	13	0	1	1	7.68	84.56
5	1	0	−1	7.07	86.57	14	0	1	−1	7.95	86.78
6	0	0	0	7.75	85.76	15	1	0	1	8.29	88.76
7	−1	0	−1	7.73	87.16	16	0	0	0	7.8	87.54
8	0	−1	1	7.81	85.74	17	0	0	0	7.82	85.57
9	0	0	0	8.35	85.50						

注： Y_1 和 Y_2 分别为除草扭矩和碎土率，表6同。
Note: Y_1 and Y_2 are the operating torque and soil fragmentation rate, respectively. Table 6 is the same.

表 6 除草刀参数试验方差分析

Table 6 Analysis of variance in weeding knife parameter test

来源 Source	Y_1				Y_2			
	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	F	P	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	F	P
模型 Model	1.310	9	67.18	**	40.390	9	153.44	**
A	0.051	1	23.21	**	8.790	1	300.56	**
B	0.037	1	16.86	**	8.870	1	303.38	**
C	0.089	1	40.68	**	4.020	1	137.36	**
AB	0.020	1	8.97	*	6.840	1	234.00	**
AC	0.217	1	99.62	**	7.120	1	243.56	**
BC	0.248	1	113.85	**	0.719	1	24.59	**
A^2	0.487	1	224.14	**	1.220	1	41.63	**
B^2	0.166	1	76.41	**	0.104	1	3.57	*
C^2	0.036	1	16.50	**	2.860	1	97.87	**
残差 Residual	0.015	7			0.204	7		
误差 Pure error	0.004	4			0.040	4		
总和 Total	1.330	16			40.600	16		

注：**和*分别表示极显著($P<0.01$)和显著($0.01<P<0.05$)。
Note: ** and * indicate highly significant ($P<0.01$) and significant ($0.01<P<0.05$), respectively.

可信度;失拟项 $P=0.066$,表明模型拟合精度较高; B 、 C 、 AC 、 AB 、 BC 、 A^2 、 C^2 对碎土率 Y_2 的影响显著($P<0.05$); B^2 对碎土率 Y_2 的影响不显著($P>0.1$)。试验指标与试验因素存在显著的二次关系,分析显示结果合理。分别建立除草扭矩 Y_1 和碎土率 Y_2 对斜切角 A 、端切角 B 、刀片数 C 的二次多项式回归方程,如下:

$$Y_1 = 7.78 - 0.08A + 0.07B + 0.1C + 0.07AB + 0.23AC - 0.25BC - 0.34A^2 + 0.2B^2 + 0.09C^2 \quad (14)$$

$$Y_2 = 85.73 + 1.05A + 1.05B - 0.7C + 1.3AB + 1.33AC - 0.42BC - 0.54A^2 + 0.16B^2 + 0.82C^2 \quad (15)$$

端切角与刀片数交互因素对除草扭矩影响见图11。当刀片数为3时,除草扭矩随端切角增大不断增加;刀片数为4时,端切角对除草扭矩影响不明显;当刀片数为5时,除草扭矩随端切角增大不断减小。

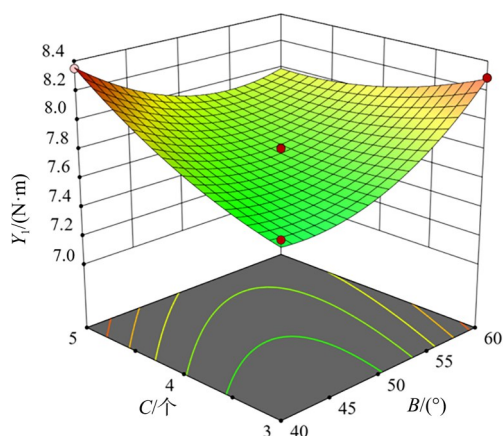


图11 端切角(B)与刀片数(C)对除草扭矩(Y_1)的影响

Fig. 11 Effect of end face inclination angle (B) and number of blades (C) on weeding torque (Y_1)

斜切角与端切角交互因素对碎土率影响见图12。当端切角 $\geq 42^\circ$ 时,碎土率随着斜切角角度增大而增加;当端切角为 60° 、斜切角 10° 时,碎土率达到最大值。

3.3.2 基于NSGA-II的除草刀参数优化

为实现除草刀参数高效多目标优化,以扭矩和碎土率为控制目标,采用非支配排序遗传算法(NSGA-II)对二阶多项式响应面模型进行循环优化。NSGA-II可通过全局搜索策略在多个目标中找到最优解,有效地平衡多个目标之间的权重,可在提升碎土率的同时降低能耗。在Isight平台上将

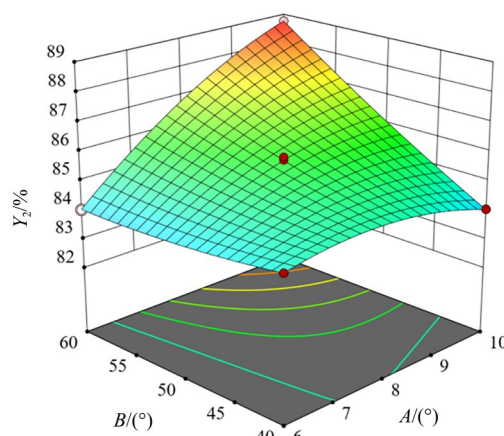


图12 斜切角(A)与端切角(B)对碎土率(Y_2)的影响

Fig. 12 Effect of blade inclination angle (A) and end face inclination angle (B) on soil broken rate (Y_2)

响应面试验得到的回归方程集成到Calculator计算模块,在Optimization模块设置NSGA-II以除草扭矩(Y_1)和碎土率(Y_2)为优化目标,结合各因素试验取值范围进行参数优化。约束模型为:

$$\begin{cases} \text{Max } Y_1(A, B, C) \\ \text{Min } Y_2(A, B, C) \\ \text{s. t. } \begin{cases} A \in [6, 10] \\ B \in [40, 60] \\ C \in [3, 5] \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

基于除草扭矩和碎土率的目标函数为:

$$Z_{\max} = i_1(M_{\max}/M_i) + i_2(K_i/K_{\max}) \quad (17)$$

式中: $Z_{\max}$ 为综合评价指标; i_1 和 i_2 分别为除草扭矩和碎土率在综合评价中的权重系数,分别为0.452和0.548; $M_{\max}$ 和 $K_{\max}$ 为17组仿真试验中除草扭矩和碎土率的最大值; M_i 和 K_i 分别表示第 i 次仿真试验所得的除草扭矩和碎土率。

设置NSGA-II初始种群数量为40,变异率0.05,交叉率0.8,迭代次数200。计算初始种群中的最优结构参数,并记录在Pareto解集中。在后续迭代过程中,通过循环计算不断更新Pareto解集^[29],算法采用精英策略选择每代中的最优解,以确保每次迭代产生的优良个体得以保留。当进化代数接近预定的最大迭代次数时,结果趋于稳定,表明此时已找到最优解。根据式(17)得到除草刀最佳参数为:斜切角 10° 、端切角 55° 、刀片3片,此时单把除草刀扭矩为7.4 Nm,碎土率为87.9%。计算得除草刀功耗约为1.4 kW。

4 田间试验

4.1 试验条件

为验证除草刀优化后除草性能,制作样机进行田间试验。试验位于河北省保定市高阳县,选取一块平整的3~5叶期玉米试验田,田间杂草高度约10 cm,土壤为砂质土壤。除草机试验深度约30 mm,前进速度约1 m/s。

试验设备包括雷沃欧豹 M504-E、立式双轴对旋除草机、容积 200 cm³ 环刀、量程 50 m 钢卷尺、量程 30 cm 钢尺、秒表、电子秤。

4.2 试验方法及结果

在试验田内用卷尺测出长度 50 m,宽度满足机具往返 2 个行程的试验区域。采用五点取样法进行取样,绝对数调查法进行统计,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、茎秆损伤或掩埋的玉米植株数量计算伤苗率。除草率(η_c)和伤苗率(η_s)计算公式为:

$$\eta_c = \frac{Q_B - H_B}{Q_B} \times 100\% \quad (18)$$

$$\eta_s = \frac{Z_s - R_s}{Z_s} \times 100\% \quad (19)$$

式中: Q_B 为除草前杂草数目,株; H_B 为除草后杂草数目,株; Z_s 为除草前玉米植株数目,株; R_s 为除草后玉米植株数目,株。

碎土率通过采样筛分称重除草后的土壤评价碎土质量。随机选取 10 块 1.2 m×1 m 除草区域测定碎土率,取样土块按照直径分为≤40 mm 和>40 mm 2 个等级,以直径≤40 mm 的土块占采样土壤总质量的百分比计算碎土率^[30]。碎土率(C_s)计算公式为:

$$C_s = \frac{m_{\text{总}} - m_{\leq 40\text{mm}}}{m_{\text{总}}} \times 100\% \quad (20)$$

式中: $m_{\text{总}}$ 为土壤总质量,g; $m_{\leq 40\text{mm}}$ 为直径≤40 mm 的土壤质量,g。

田间试验表明本研究设计的立式双轴对旋除草机能有效清除行间杂草(图 13),平均除草率为 94.67%,平均伤苗率 3.74%。与传统除草机相比^[31],平均除草率提升 3.82%,伤苗率下降 0.37%。对除草后土壤进行采样称重计算,平均碎土率为 84%,与仿真试验结果(87.9%)的相对误差约为 3.9%。综上,本研究除草机在除草和碎土方面均具有良好性能。



图 13 立式双轴对旋除草机除草效果

Fig. 13 Weeding effect of vertical dual-shaft counter-rotating weeding machine

5 结 论

本研究针对玉米大田机械除草机除草效率低、除草质量差等问题,设计了一种立式双轴对旋除草机。利用离散元法建立了牛筋草根系-土壤复合体柔性模型;与除草刀工作过程结合,构建了能够模拟除草刀-根土复合体相互作用的刚柔耦合仿真模型。采用预试验、单因素仿真试验和多因素仿真试验,以斜切角、端切角和刀片数量为影响因素,除草扭矩和碎土率为响应值,对除草刀除草过程进行仿真分析,探究各因素对响应值的影响规律。采用 NSGA-II 对二阶多项式响应面模型优化,得到除草刀最佳参数组合:斜切角 10°、端切角 55°、除草刀片 3 个。田间试验结果表明:在此参数组合下,除草率为 94.67%,伤苗率 3.74%,比传统除草机除草率提高了 3.82%,伤苗率下降了 0.37%;碎土率为 84%,与仿真试验结果的相对误差为 3.9%。

参考文献 References

- [1] Sang Z Q, Zhang Z Q, Yang Y X, Li Z W, Liu X G, Xu Y B, Li W H. Heterosis and heterotic patterns of maize germplasm revealed by a multiple-hybrid population under well-watered and drought-stressed conditions[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, 21(9): 2477-2491
- [2] Lu Y Z, Wang F Y, Luo H, He W W, Li D J, Bao Y H, Zhang Z Y, Zhou C S. Changes in phytochemical profiles, relevant enzyme activity and antioxidant capacity of different germinated maize varieties[J]. *Food Bioscience*, 2023, 56: 103410
- [3] 顾炳龙. 玉米株间避苗除草技术及其配套装置研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023
- [4] Gu B L. Research on technology and devices for intra-row weeding avoiding seedling between maize (*Zea mays* L.) plants[D]. Changchun: Jilin University, 2023 (in Chinese)
- [4] Fennimore S A, Cutulle M. Robotic weeders can improve weed control

- options for specialty crops[J]. *Pest Management Science*, 2019, 75(7): 1767-1774
- [5] 王文明, 王天元, 郭兵, 陈旭, 周福君. 基于振动减阻原理的旋转中耕机关键部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 35-45
Wang W M, Wang T Y, Guo B, Chen X, Zhou F J. Design and experiment of key components of rotary cultivator based on vibration reducing resistance principle[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(3): 35-45 (in Chinese)
- [6] 韩豹, 申建英, 李悦梅. 3ZCF-7700型多功能中耕除草机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 124-129
Han B, Shen J Y, Li Y M. Design and experiment on 3ZCF-7700 multi-functional weeding-cultivating machine[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1): 124-129 (in Chinese)
- [7] 韩豹, 郭畅, 高英玲, 刘俏, 孙硕, 董小伟. 大豆株间除草单体机构及关键部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 112-121
Han B, Guo C, Gao Y L, Liu Q, Sun S, Dong X W. Design and experiment of soybean intra-row weeding monomer mechanism and key components[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(6): 112-121 (in Chinese)
- [8] 韩豹, 吴文福, 申建英. 水平圆盘式苗间除草装置试验台优化试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 142-146
Han B, Wu W F, Shen J Y. Optimization experiment on test-bed of horizontal disk weeding unit between seedlings[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(2): 142-146 (in Chinese)
- [9] 曹成茂, 向旺, 罗坤, 吴正敏, 张雪晨, 秦宽. 抛推组合式前胡草土分离除草机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 106-114
Cao C M, Xiang W, Luo K, Wu Z M, Zhang X C, Qin K. Design and experiment of *Rodix 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)
- [10] 杜伟. 智能仿生除草机的设计与试验[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023
Du W. Design and experiment of intelligent biomimetic weeding machine [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [11] 吕金庆, 刘金妮, 赵治明, 杨德秋, 李季成, 孙琪. 马铃薯碎土整地联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 19-29
Lü J Q, Liu J N, Zhao Z M, Yang D Q, Li J C, Sun Q. Design and test of key components of potato soil-crushing site preparation machine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(8): 19-29 (in Chinese)
- [12] 丁启翔, 任骏, BELAL Eisa Adam, 赵吉坤, 葛双洋, 李杨. 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 Q S, Ren J, Adam B, Zhao J K, Ge S Y, Li Y. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3): 38-48 (in Chinese)
- [13] 张锋伟, 宋学锋, 张雪坤, 张方圆, 魏万成, 戴飞. 玉米秸秆揉丝破碎过程力学特性仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 58-65
Zhang F W, Song X F, Zhang X K, Zhang F Y, Wei W C, Dai F. Simulation and experiment on mechanical characteristics of kneading and crushing process of corn straw[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(9): 58-65 (in Chinese)
- [14] 唐敏, 汪力, 陈治国, 魏祥. 激光熔覆工艺参数对Fe-W-B熔覆层质量的影响[J]. 激光与红外, 2024, 54(5): 718-724
Tang M, Wang L, Chen Z G, Wei X. Influence of laser cladding process parameters on the quality of Fe-W-B cladding layer [J]. *Laser & Infrared*, 2024, 54(5): 718-724 (in Chinese)
- [15] 尤泳, 贺长彬, 王德成, 王光辉. 土壤耕作部件极窄刀齿与土壤作用关系研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 50-58
You Y, He C B, Wang D C, Wang G H. Interaction relationship between soil and very narrow tine during penetration process [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(6): 50-58 (in Chinese)
- [16] 周华, 张文良, 杨全军, 李东东, 夏俊芳. 滑切型自激振动减阻深松装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 71-78
Zhou H, Zhang W L, Yang Q J, Li D D, Xia J F. Design and experiment of sliding cutting self-excited vibration drag reduction subsoiling device [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(5): 71-78 (in Chinese)
- [17] 郑侃, 何进, 李洪文, 刁培松, 王庆杰, 赵宏波. 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 K, He J, Li H W, Diao P S, Wang Q J, Zhao H B. Research on polyline soil-breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(9): 62-72 (in Chinese)
- [18] 苑进, 李金光, 邹亮亮, 刘雪美. 基于离散元的菠菜收获机根切铲优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S2): 85-98
Yuan J, Li J G, Zou L L, Liu X M. Optimal design of spinach root-cutting shovel based on discrete element method [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(S2): 85-98 (in Chinese)
- [19] 秦璟云. 立轴式中耕锄草机的设计研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2022
Qin J Y. Design and research of vertical axle type cultivator weeder[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2022 (in Chinese)
- [20] 甘凤玲, 韦杰, 李沙沙. 紫色土壤坎典型草本根系摩阻特性对土壤含水率的响应[J]. 草业学报, 2022, 31(7): 28-37
Gan F L, Wei J, Li S S. Response of root-soil friction characteristics of three common grasses to soil water content in purple soil bunds[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(7): 28-37 (in Chinese)
- [21] 廖庆喜, 林建新, 张青松, 谢昊明, 杜文斌, 吴崇. 稻油轮作区铲耩式油菜直播种床整备机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 26-35
Liao Q X, Lin J X, Zhang Q S, Xie H M, Du W B, Wu C. Design and experiment of shovel type seedbed preparation machine suitable for rapeseed direct seeding [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(10): 26-35 (in Chinese)
- [22] 赵淑红, 高连龙, 袁溢文, 侯磊涛, 张鑫, 杨悦乾. 基于离散元法的深松作业玉米秸秆运动规律[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 53-62
Zhao S H, Gao L L, Yuan Y W, Hou L T, Zhang X, Yang Y Q. Maize straw motion law in subsoiling operation using discrete element method [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(20): 53-62 (in Chinese)
- [23] 宋占华, 李浩, 闫银发, 田富洋, 李玉道, 李法德. 桑园土壤非等径颗粒离散元仿真模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 21-33
Song Z H, Li H, Yan Y F, Tian F Y, Li Y D, Li F D. Calibration method of contact characteristic parameters of soil in mulberry field based on unequal-diameter particles DEM theory [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(6): 21-33 (in Chinese)
- [24] 王昭宇, 尤泳, 贺长彬, 王德成, 张学宁. 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 Z Y, You Y, He C B, Wang D C, Zhang X N. 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)
- [25] Zhao Z, Wang D W, Shang S Q, Hou J L, He X N, Gao Z H, Xu N, Chang Z C, Guo P, Zheng X S. Analysis of *Cyperus esculentus*-soil dynamic behavior during rotary tillage based on discrete element method [J]. *Agriculture*, 2023, 13(2): 358
- [26] 刘俊安. 基于离散元方法的深松铲参数优化及松土综合效应研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018
- Liu J A. Study on subsoiler parameters optimization and comprehensive effect of subsoiling based on the discrete element method [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [27] Lenaerts B, Aertsen T, Tijskens E, De Ketelaere B, Ramon H, De Baerdemaeker J, Saeyns W. Simulation of grain-straw separation by discrete element modeling with bendable straw particles [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 101: 24-33
- [28] 吕金庆, 刘齐卉, 李紫辉, 李季成, 刘中原. 犁铧式马铃薯中耕机培土装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 71-82
- Lu J Q, Liu Q H, Li Z H, Li J C, Liu Z Y. Design and experiment of soil cultivating device of plowshare potato field cultivator [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(7): 71-82 (in Chinese)
- [29] 郝志豪, 郑恩来, 李勋, 姚昊萍, 汪小昆, 钱生越, 李伟勋, 朱敏. 免耕播种机旋耕刀耕作性能分析与结构优化[J]. 农业工程学报, 2023, 39(2): 1-13
- Hao Z H, Zheng E L, Li X, Yao H P, Wang X C, Qian S Y, Li W X, Zhu M. Performance analysis of the soil-contacting parts for no-tillage planters and optimization of blade structure [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(2): 1-13 (in Chinese)
- [30] 郝建军, 于海杰, 赵建国, 李建昌, 马志凯, 蔡金金. 楔形减阻旋耕刀设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 55-64
- Hao J J, Yu H J, Zhao J G, Li J C, Ma Z K, Cai J J. Design and test of wedge drag reduction rotary blade [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(8): 55-64 (in Chinese)
- [31] 齐浩凯. 机械化学复合式玉米除草机设计与试验[D]. 保定: 河北农业大学, 2022
- Qi H K. Design and test of mechanochemical composite corn weeder [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 代斌豪, 河北农业大学农业机械化工程专业硕士研究生, 主要研究方向为大田除草机械。曾多次获得校级奖学金, 获得专利1项, 参与国家级研究项目1项, 省部级研究项目2项。



通讯作者简介: 赵建国, 教授, 博士, 河北省现代农业产业技术体系旱碱麦创新团队岗位专家。主要从事耕整地机械装备设计及理论研究。主持或主研完成省部级以上科研项目20余项, 获市级科技进步奖3项。发表学术论文60余篇, 获授权专利100余件, 主编教材2部。