doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.026

大豆行间驱拨组合式除草机设计与试验

丁　力　袁业超　李源源　王凯选　姜智严　杨自尚　李　赫
（河南农业大学机电工程学院，郑州 450002）

摘要：针对黄淮海地区秸秆覆盖条件下苗期除草存在易堵塞、草土黏连易导致再生等问题，本文提出了一种驱动拨秸和被动分离草土协同作业方法，设计了一种周向锯齿式拨秸与协作分离草土的大豆行间驱拨组合式除草机。对周向锯齿式拨抛清秸装置和草土分离轮等关键部件与秸秆和杂草间的相互作用规律进行理论分析，确定了关键影响因素及其取值范围；通过 EDEM 仿真平台建立了清秸装置-土壤-秸秆相互作用仿真模型，以拨秸率和平均秸秆位移变化量为评价指标，确定了周向锯齿式拨抛清秸装置最佳作业参数；利用 MBD－DEM 耦合仿真试验对除草机作业过程进行模拟，以土壤扰动量和秸秆覆盖率为评价指标，确定了除草机最优作业参数为：回转半径 140 mm、作业倾角 50°、作业速度为 6.94 km/h，此时，土壤扰动量为 87.01%，秸秆覆盖率为 26.07%；通过田间试验对整机作业性能进行了验证。试验结果表明，当作业速度为 7 km/h 时，除草率、伤苗率和秸秆覆盖率平均值分别为 93.31%、5.51% 和 36.38%，该机具实现了秸秆引导式拨抛，有效解决了免耕除草机堵塞和除草率较低等问题，为黄淮海地区大豆机械除草提供了实用性技术。

关键词：除草机；清秸装置；草土分离轮；MBD－DEM 耦合仿真
中图分类号：S234.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)09-0344-11　　**OSID**：

Design and Testing of Combined Soybean Inter-row Roundup Weeder

DING Li　YUAN Yechao　LI Yuanyuan　WANG Kaixuan　JIANG Zhiyan　YANG Zishang　LI He
(*College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Henan Agricultural University*, *Zhengzhou* 450002, *China*)

Abstract: In view of the problems of easy blockage and easy regeneration of grass and soil under straw mulching conditions in the Huang－Huai－Hai region, a synergistic operation method of driving straw plucking and passive separation of grass and soil was proposed, and an inter-row drive-pulling combined weeder for soybeans with circumferential serrated straw plucking and collaborative separation of grass and soil was designed. The theoretical analysis of the interaction law between the key components such as the circumferential serrated straw-pulling device and the grass－soil separating wheel and the straw and weeds was carried out, and the key influencing factors and their ranges of values were determined; the simulation model of the interaction between the straw-pulling device and the soil-straw interaction was established through the EDEM simulation platform, and the optimal design of the circumferential serrated straw-pulling device was determined by using the straw-pulling rate and the average change in the displacement of the straw as the evaluation indexes; the MBD－DEM coupled simulation test was used to simulate the operation process of the weeder, the optimum structural parameters of the weeder were analyzed by taking the soil disturbance amount and the straw coverage as the evaluation indexes. When the rotary radius was 140 mm, the working inclination was 50°, the working speed was 6.94 km/h, the soil disturbance was 87.01%, and the straw cover rate was 26.07%; the operational performance of the whole machine was verified through field test, and the test results showed that at 7 km/h, the average of the weeder rate, seedling wounding rate, and the straw cover rate were 93.31%, 5.51%, and 36.38%, respectively, and the machine realized the guided plucking and casting of the straw, which effectively solved the problems of the no-tillage weeder's clogging and the low weeder rate. The research result can provide practical technology for soybean mechanical weed control in the Huang－Huai－Hai region.

Key words: weeding machine; straw clearing devices; grass－soil separating wheel; MBD－DEM coupled simulation

收稿日期：2025－03－31　修回日期：2025－04－21
基金项目：国家现代农业产业技术体系项目(CARS－04)、国家重点研发计划项目(2022YFD2300904)和河南省科技攻关项目(252102111171)
作者简介：丁力(1989—)，男，副教授，博士，主要从事智能农业装备技术研究，E-mail：604295294@qq.com
通信作者：李赫(1972—)，男，教授，博士，主要从事智能农业装备技术研究，E-mail：chungbuk@163.com

0　引言

黄淮海地区是我国大豆第二大产区，在冬小麦-夏大豆种植模式中，秸秆还田能够显著增加水分利用率，实现大豆增产[1-2]。但田间草害是影响大豆产量的主要因素。目前化学除草仍是田间杂草防控的主要方式，因化学除草导致的污染等问题逐渐引发国内外学者们对机械除草的关注[3-4]。SAPUNII 等[5]设计了一种滚筒耙行间除草机，通过理论分析和田间试验进行优化改进；NARENDRA 等[6]设计了一种株间和行间组合式除草机，通过土槽试验得到最佳参数，并通过田间试验对其性能进行验证；MICHAEL 等[7]将传感器集成到机械除草中，通过田间试验对性能进行了验证，为精密机械除草使用提供了借鉴；TANG 等[8]设计了一种具有往复式除草铲和自适应轮廓机构的机械行间除草机，通过仿真对结构进行优化设计，并通过田间试验验证了其工作性能；XIE 等[9]通过建立杂草-土壤-机器交互过程的功耗模型设计了一种滚刀式智能除草机，通过 EDEM 仿真和田间试验验证了低功耗、高效率的特点；JIA 等[10]设计了一种行间避障铲式除草机，通过 ADAMS 仿真确定了最佳参数，为作物行间除草提供了参考；曹成茂等[11]设计了一种抛推组合式前胡除草机，通过 EDEM 和 ANSYS 耦合仿真与田间试验验证了其工作性能。以上除草机均有优良的除草性能。然而，黄淮海地区冬小麦-夏大豆轮作，行间秸秆量大，进行苗期除草易引发堵塞和草土黏连，造成秸秆堆积伤苗率高、杂草易再生、除草率低和秸秆覆盖层破坏等现象。

结合黄淮海地区免耕作业秸秆覆盖情况及苗期机械除草作业农艺需求，本文设计一种具备引导拨抛功能的周向锯齿式清秸及其配套除草和分离装置，以实现拨秸、除草和破碎黏连草土功能。通过对关键部件与杂草和秸秆的相互作用规律进行理论分析，确定关键影响因素，并利用 EDEM 仿真分析周向锯齿式拨抛清秸装置最佳的作业参数组合，通过 MBD - EDM 仿真确定大豆行间驱拨组合式除草机整体最佳作业参数，通过田间试验对除草机作业性能进行验证。

1　整机结构与工作原理

1.1　整机结构

大豆行间驱拨组合式除草机主要针对黄淮海地区秸秆覆盖条件下，在苗期进行机械除草作业设计，其结构如图 1 所示。

除草机主要由草土分离轮、护苗装置、曲率弹杆除草铲、防堵梳齿、周向锯齿式拨抛清秸装置、直流电机等组成，主要技术参数如表 1 所示。

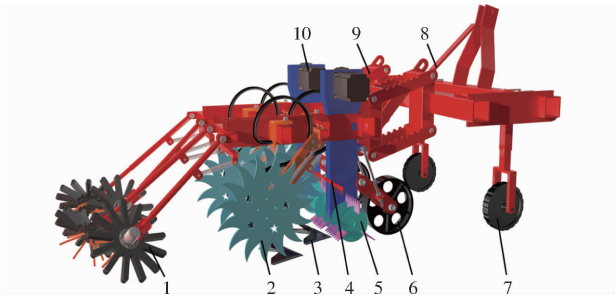


图 1　大豆行间驱拨组合式除草机结构图

Fig. 1　Overall structure diagram of combined weeder for soybean row repellents

1. 草土分离轮　2. 护苗装置　3. 曲率弹杆除草铲　4. 防堵梳齿　5. 周向锯齿式拨抛清秸装置　6. 地轮　7. 支撑轮　8. 机架　9. 四杆仿形机构　10. 直流电机

表 1　主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 200×1 200×870
配套功率/kW	>15
整机质量/kg	280
清秸装置转速/(r·min^{-1})	300～500
单行作业幅宽/mm	380

1.2　工作原理

在除草作业时，大豆行间驱拨组合式除草机由拖拉机动力牵引。通过地轮和四杆仿形机构实现除草单体垂直位移动态补偿，保障周向锯齿式拨抛清秸装置与地表秸秆层持续接触。清秸装置通过直流电机驱动，经链传动系统将扭矩传递至周向非对称锯齿拨刀，通过秸秆周向喂入-纵向抛送机制形成清秸带，为后置双曲率弹杆除草铲创造低秸秆干扰除草区域，同时，配合被动旋转式草土分离轮将秸秆均匀导流行间，促进草土分离。

2　关键部件设计

2.1　周向锯齿式拨抛清秸装置设计

周向锯齿式拨抛清秸装置对秸秆引导式拨抛，减少机器作业时因秸秆堵塞造成的伤苗，其主要由锯齿式拨刀、防堵梳齿、直流电机等组成，结构如图 2 所示。

黄淮海地区夏大豆行距为 300～400 mm[12]，基于行距为 400 mm 的农艺要求进行除草研究。装置采用锯齿式拨刀组合式动态清秸系统，在拨秸作业时，拨刀需达到合适的入土深度，如图 3 所示。

图中：Ⅰ为周向锯齿式拨刀出土工作时刻；Ⅱ为周向锯齿式拨刀再次入土工作时刻；Ⅲ为周向锯齿式拨刀非入土工作时刻；L 为装置两侧距离，mm；θ 为拨秸偏角，rad。

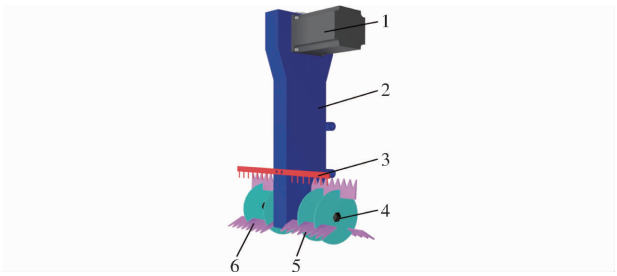


图 2 周向锯齿式拨抛清秸装置示意图

Fig. 2 Schematic of circumferential sawtooth-type straw throwing and clearing device

1. 直流电机 2. 链轮保护壳 3. 防堵梳齿 4. 从动刀轴 5. 锯齿式拨刀 6. 拨秸圆盘

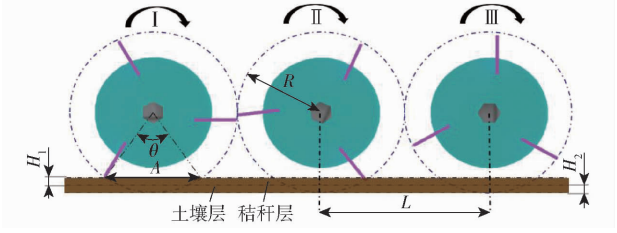


图 3 周向锯齿式拨抛清秸装置侧边作业图

Fig. 3 Side view of circumferential sawtooth-type straw throwing and clearing device

周向锯齿式拨抛清秸装置旋转半径满足

$$R^2 = (R - H_1 - H_2)^2 + \frac{A^2}{4} \tag{1}$$

式中 R——装置旋转半径,mm

H_1——秸秆厚度,取 20 mm[13]

H_2——锯齿式拨刀入土深度,mm

A——清秸带宽,mm

根据黄淮海地区秸秆力学特性、拨齿结构强度等因素[14-15],为保证稳定拨秸效果,经前期预试验,取装置旋转半径为 100 mm。考虑到装置能量损耗,将周向锯齿式拨刀入土深度 H_2 设为 0 ~ 20 mm,在旋转半径以及锯齿式拨刀齿长确定的情况下,锯齿式拨刀齿数越多,间距越小,拨秸效果越好,但入土压力增大,且间距过小,容易造成秸秆堵塞,因此通过 EDEM 仿真确定最优参数。

为确保装置能够引导秸秆拨抛,防堵减阻,参考防缠绕机理研究[16],建立秸秆质心的空间运动坐标系如图 4 所示,推导秸秆运动过程动力学平衡方程。为实现秸秆有效滑移,应保证秸秆自重与离心力的矢量合大于拨刀摩擦阻力与土壤粘附力的合力。因此,为达到上述稳定拨秸效果应满足

$$\begin{cases} \omega = 2\pi n_p \\ F_C = m\omega^2 R \\ F_N = m\omega^2 R\sin\beta + mg\sin(\alpha+\beta) + F_{f2}\cos(\alpha+\beta) \\ m\omega^2 R\cos\beta + mg\cos(\alpha+\beta) - \mu F_N - F_{f2}\sin(\alpha+\beta) > 0 \end{cases} \tag{2}$$

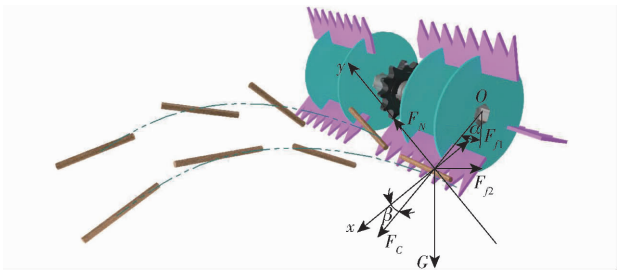


图 4 拨秸受力分析

Fig. 4 Force analysis of plucked straw

其中 $\alpha = \theta/2$

式中 ω——周向锯齿式拨刀角速度,rad/s

m——秸秆质量,g

F_C——秸秆所受的离心力,N

α——离心力与垂直方向夹角,rad

β——离心力与 x 轴夹角,rad

F_N——秸秆所受托持力,N

F_{f2}——地面对秸秆的摩擦力,N

μ——滑动摩擦因数,取 0.3[17]

n_p——从动刀轴转速,r/min

由式(2)可得,随着 α 减小,周向锯齿式拨刀后抛秸秆所需的作用力和距离减小,当 α 小于 0°时,拨刀对秸秆不产生后抛作用效果,分析得秸秆抛出时 α 受到入土深度的影响,计算得为 0° ~ 36°。

周向锯齿式拨抛清秸装置通过电机提供驱动力,再通过链轮进行减速传动,由电机转速分析得

$$P = \frac{Tn_p}{9\,550} = \frac{\pi z_1 n_p^2}{2.865 \times 10^5 z_2} \tag{3}$$

$$n_p \geqslant \frac{5 \times 10^4 (1+k) v_m}{9A} \tag{4}$$

式中 T——电机施加扭矩,N·m

z_2——主动齿轮齿数

z_1——从动齿轮齿数

P——电机功率,W

v_m——除草机作业速度,km/h

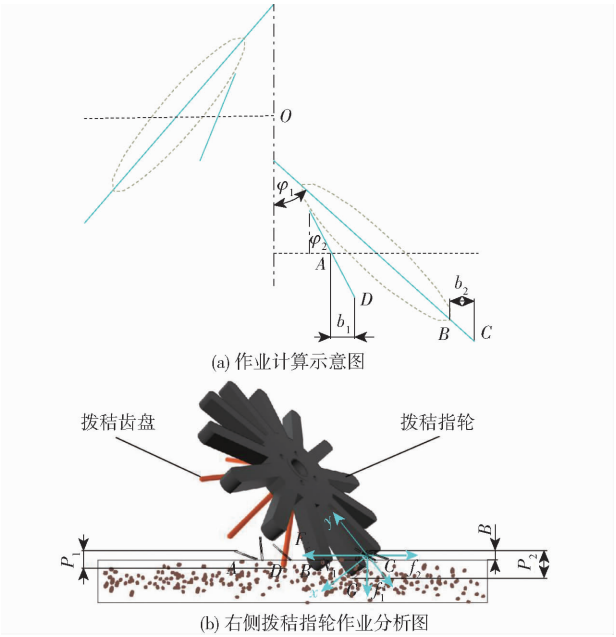
k——补偿系数,取 0.2[18]

经前期预试验,综合考虑确定主动齿轮齿数为 14、从动齿轮齿数为 18。设计的大豆行间驱拨组合式除草机最大速度不超过 7 km/h,根据式(4)计算得从动刀轴转速应大于 389 r/min,代入式(3)计算电机最小功率需大于 2.1 kW,最终选择 2.3 kW 直流电机作为动力输入。

2.2 草土分离轮设计

针对因土壤扰动不足、易黏附土壤造成杂草再生的问题,设计草土分离轮,包括拨秸指轮和齿盘,在作业过程中装置被动旋转,利用齿盘进一步碎土,实现草土分离,利用指轮将秸秆和表土均匀拨送行

间。设计中以秸秆中心为原点，指轮对秸秆作用力为坐标轴建立坐标系计算，如图 5 所示。



(a) 作业计算示意图

(b) 右侧拨秸指轮作业分析图

图 5　草土分离轮作业示意图

Fig. 5　Grass – soil separator wheel operation

假设秸秆覆盖情况相同，当拨秸指轮与作业机器前进方向夹角为 φ_1，拨秸齿盘与作业机器前进方向夹角为 φ_2 时，理论工作宽度 b_1、b_2 为

$$\begin{cases} b_1 = l_{AD}\sin\varphi_1 \\ b_2 = l_{BC}\sin\varphi_2 \\ b = b_1 + b_2 \end{cases} \tag{5}$$

其中

$$\begin{cases} l_{AD} = \sqrt{R_1^2 - (R_1 - P_1 + i)^2} \\ l_{BC} = \sqrt{R_2^2 - (R_2 - P_2 + i)^2} \end{cases} \tag{6}$$

式中　b——工作宽度，mm

b_1——拨秸齿盘理论工作宽度，mm

b_2——拨秸指轮理论工作宽度，mm

l_{AD}——拨秸齿盘作业距离，mm

l_{BC}——拨秸指轮作业距离，mm

R_1——拨秸齿盘回转半径，mm

R_2——拨秸指轮回转半径，mm

P_1——拨秸齿盘入土深度，mm

P_2——拨秸指轮入土深度，mm

i——地表秸秆覆盖厚度，mm

由式(5)可得，工作宽度 b 由拨秸指轮回转半径与齿盘入土深度共同决定，结合上文农艺要求，为满足作业宽度，拨秸齿盘回转半径为 130 ~ 160 mm。拨秸齿盘厚度越小，其入土压力越小，但厚度过小易影响工作稳定，结合经验公式

$$\kappa = 0.016R_1 + 1 \tag{7}$$

式中　κ——拨秸指轮厚度，计算得最小值为 3 mm，取 3.5 mm

随着草土分离轮继续前进工作，在拨秸指轮工作宽度范围内，秸秆扰动迁移过程中受力如图 5b 所示，可得

$$\begin{cases} F_x = (m\omega_1^2 R_1 - f_2)\cos\varphi_1 + N_1 + mg\sin\varphi_1 \\ F_y = \mu N_1 + mg\cos\varphi_1 \\ F = \sqrt{[(m\omega_1^2 R_1 - f_2)\cos\varphi_1 + N_1 + mg\sin\varphi_1]^2 + (\mu N_1 + mg\cos\varphi_1)^2} \end{cases} \tag{8}$$

式中　ω_1——拨秸指轮角速度，rad/s

f_2——土壤对秸秆的摩擦力，N

N_1——拨秸指轮对秸秆的支持力，N

f_1——装置对秸秆产生的摩擦力，N

秸秆所受拨秸指轮合力大于秸秆所受土壤以及装置对其的摩擦力，秸秆向行间滑移，合力受到回转半径 R_1 和作业夹角 φ_1 影响，为探究最佳作业性能，需通过 MBD – DEM 耦合仿真确定最佳参数。

3　仿真试验

根据前文分析可知，装置拨刀齿数、回转半径以及作业速度是影响作业性能的重要参数，因此为确定周向锯齿式拨抛清秸装置最佳作业参数，开展离散元仿真试验。

3.1　土壤秸秆模型建立

根据黄淮海地区作业条件，利用 EDEM 建立虚拟土槽模型，根据文献[19 – 20]设置离散元仿真模型参数如表 2 所示。

根据实际免耕播种对秸秆长度的要求[21]，在 EDEM 仿真中，秸秆模型由球形颗粒组成的圆柱体表示，长度与比例分别为 30(0.1)、40(0.1)、50(0.2)、60(0.2)、70(0.2)、80(0.1)、90 mm(0.1)，土壤模型由球形颗粒组成，半径为 0.5 mm，在不影响仿真结果前提下，对模型进行简化，如图 6 所示。

3.2　EDEM 仿真

根据设计结果，选取拨刀齿数、入土深度和作业速度 3 个因素，以拨秸率和平均秸秆位移变化量为评价指标，设置三因素三水平正交试验并进行仿真，试验因素水平如表 3 所示。利用 EDEM 后处理功能添加 Grid Bin Group 传感器，检测颗粒类型为秸秆，设置检测区域设置长 × 宽 × 高为 6 000 mm × 440 mm × 200 mm，分析作业区域平均秸秆位移变化量，检测区域长 × 宽 × 高为 100 mm × 440 mm × 100 mm，分析作业区域拨秸率，其计算式为

$$\psi = \left(1 - \frac{\partial x_1}{\partial x_2}\right) \times 100\% \tag{9}$$

式中　ψ——拨秸率，%

∂x_1——仿真后检测区秸秆质量，g

∂x_2——仿真前检测区秸秆质量,g

表 2 材料参数与接触参数

Tab. 2 Material parameters and contact parameters

项目	参数	数值
周向锯齿式拨抛清秸装置(清秸装置)	泊松比	0.28
	剪切模量/Pa	2.07×10^{12}
	密度/(kg·m^{-3})	7 850
土壤颗粒	泊松比	0.38
	剪切模量/Pa	1×10^{6}
	密度/(kg·m^{-3})	1 850
秸秆颗粒	泊松比	0.44
	剪切模量/Pa	1×10^{7}
	密度/(kg·m^{-3})	241
土壤颗粒-土壤颗粒	碰撞恢复系数	0.6
	静摩擦因数	0.6
	动摩擦因数	0.4
土壤颗粒-清秸装置	碰撞恢复系数	0.6
	静摩擦因数	0.6
	动摩擦因数	0.05
秸秆颗粒-秸秆颗粒	碰撞恢复系数	0.5
	静摩擦因数	0.3
	动摩擦因数	0.3
秸秆颗粒-清秸装置	碰撞恢复系数	0.6
	静摩擦因数	0.3
	动摩擦因数	0.01
土壤颗粒-秸秆颗粒	碰撞恢复系数	0.5
	静摩擦因数	0.3
	动摩擦因数	0.05

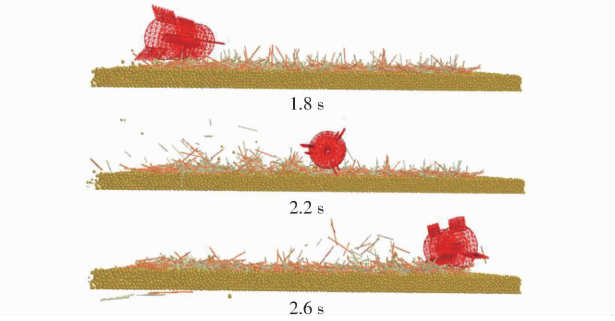


图 6 仿真作业示意图

Fig. 6 Schematic of simulation operation

表 3 试验因素水平

Tab. 3 Experimental factors and levels

水平	因素		
	拨刀齿数/个	入土深度/mm	作业速度/(km·h^{-1})
1	6	0	3
2	8	10	5
3	10	20	7

仿真试验结果如表 4 所示,A、B、C 为因素水平。

通过 EDEM 中的 Grid Bin Group 传感器对各个长度秸秆进行检测,得到 9 个作业工况下拨秸率和平均秸秆位移变化量,如图 7 所示。

表 4 试验方案及结果

Tab. 4 Three-factor experimental programme and results

试验编号	因素			拨秸率/%	平均秸秆位移变化量/mm
	A	B	C		
1	1	1	1	50.28	52.24
2	1	2	2	66.90	86.71
3	1	3	3	79.58	104.00
4	2	1	2	90.14	126.29
5	2	2	3	64.79	81.00
6	2	3	1	54.29	31.14
7	3	1	3	81.43	154.86
8	3	2	1	52.11	52.57
9	3	3	2	62.68	67.29

在不同作业工况仿真作业过程中,当秸秆长度为 30 ~ 60 cm 时,拨秸率随着秸秆长度增大整体呈增大趋势,当秸秆长度为 60 ~ 90 cm 时,拨秸率随着秸秆长度增大整体呈先减小再增大趋势;平均秸秆位移变化量随着秸秆长度增大呈先增大再减小趋势。在 9 种作业工况下,对于拨秸率而言,8 种工况均为中长秸秆作业效果明显,最高达到 94.44%;对于平均秸秆位移变化量而言,9 种工况均为中长秸秆作业效果明显,最大秸秆位移变化量达到 192.93 mm,能够实现将中长秸秆拨抛至除草铲后方的设计需求,有效解决了免耕除草机堵塞问题。极差分析结果如表 5 所示。

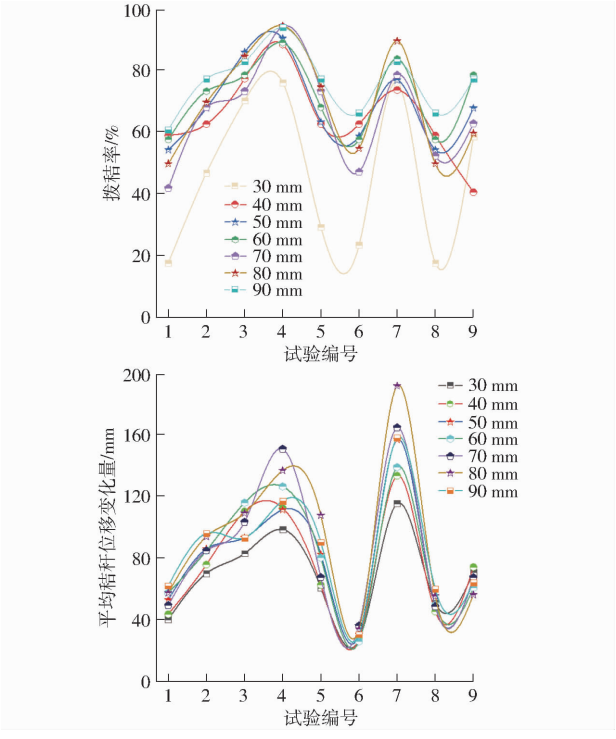


图 7 不同试验工况下作业指标

Fig. 7 Plot of operational indicators under different test conditions

表 5　仿真试验结果极差分析

Tab. 5　Extreme variance analysis of simulation test results

指标	因素	水平 1	水平 2	水平 3	极差	优水平
拨秸率	A	65.59	69.74	65.41	4.33	2
	B	73.95	61.27	65.52	12.68	1
	C	52.23	73.24	75.27	23.04	3
平均秸秆位移变化量	A	80.98	79.48	91.57	12.09	3
	B	111.13	73.43	67.48	43.65	1
	C	45.32	93.43	113.29	67.97	3

由表 5 可知，对于拨秸率和平均秸秆位移变化量两个指标，影响程度由大到小为 C、B、A。根据上述理论设计，对于周向锯齿式拨抛清秸装置最关键的评价指标为拨秸率，比较 A_2 和 A_3，两水平对平均秸秆位移变化量影响差距较小，选取最优水平 A_2；对于因素 B，装置随着入土深度增加，拨秸率呈先减小后增大趋势，平均秸秆位移变化量呈不断减少趋势，即装置入土深度与秸秆扰动呈正相关，但土壤受到扰动之后会对秸秆的产生二次干扰，降低平均秸秆位移变化量，因此选取最优水平 B_1；对于因素 C，拨秸率和平均秸秆位移变化量均与作业速度呈正相关，选取最优水平 C_3，结合式(4)综合考虑选取最佳作业参数为 $A_2B_1C_3$。

3.3　MBD 仿真平台建立

大豆行间驱拨组合式除草机工作时包括草土分离轮和除草铲对秸秆及杂草的被动作业，以及周向锯齿式拨抛清秸装置对秸秆的主动旋抛作业。草土分离轮依靠摩擦驱动实现在草-土复合介质的被动旋转，需使用 Recurdyn 平台建立刚柔耦合 MBD 模型，实现将运动参数实时映射为 DEM 颗粒接触边界的约束，为减少仿真时间，将除草机简化，忽略机架和连接件的作用力、空气阻力等对作业结果影响不大的微小运动，并设置约束，使其按照规定作业路径运动，如图 8 所示。

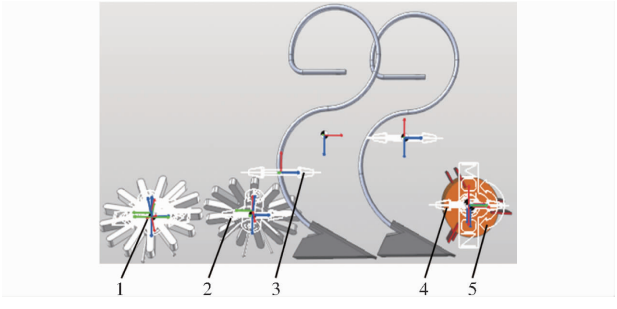


图 8　除草机运动仿真模型

Fig. 8　Simulation model of weeder motion

1. 草土分离轮与连接轴间旋转副　2. 草土分离轮与地面间移动副　3. 除草铲与地面间移动副　4. 清秸装置与地面间移动副　5. 清秸装置与刀轴间旋转副

3.3.1　MBD - DEM 耦合仿真方法

基于 MBD - DEM 仿真平台，参照文献[22]，选取回转半径、作业倾角和作业速度 3 个因素，以土壤扰动量和秸秆覆盖率为评价指标开展三因素三水平正交旋转组合试验。结合理论计算与 3.2 节仿真结果，确定试验因素编码如表 6 所示。

表 6　试验因素编码

Tab. 6　Test factors and coding

编码	因素 回转半径/mm	因素 作业倾角/(°)	因素 作业速度/(km·h^{-1})
-1	140	40	3
0	150	45	5
1	160	50	7

利用 EDEM 后处理功能添加 Grid Bin Group 传感器，设置检测区域设置长 × 宽 × 高为 6 000 mm × 440 mm × 200 mm，试验方案与结果如表 7 所示，E、U、G 为因素编码。

表 7　试验方案与结果

Tab. 7　Experimental programme and results

试验编号	因素 回转半径 E	因素 作业倾角 U	因素 作业速度 G	土壤扰动量 Y_1/%	秸秆覆盖率 Y_2/%
1	0	-1	1	92.42	15.50
2	1	1	0	70.45	37.50
3	0	-1	-1	66.21	44.67
4	0	0	0	84.79	30.53
5	0	1	-1	75.66	39.50
6	0	0	0	81.37	14.75
7	-1	0	1	88.79	19.01
8	0	0	0	83.45	29.75
9	1	0	-1	61.12	46.08
10	-1	0	-1	76.75	40.08
11	1	-1	0	78.78	29.50
12	-1	1	0	81.53	34.75
13	0	0	0	81.77	31.17
14	0	0	0	83.53	28.42
15	0	1	1	87.23	20.42
16	1	0	1	77.92	18.25
17	-1	-1	0	86.52	29.67

由表 8 可知，回转半径、作业倾角和作业速度三因素对土壤扰动量和秸秆覆盖率的影响不同。对于土壤扰动量的影响，试验模型、回转半径和作业速度均极显著($P<0.01$)，对于秸秆覆盖率的影响，试验模型显著($0.01<P\leqslant0.05$)，作业速度极显著($P<0.01$)，试验模型失拟项均不显著($P>0.05$)，说明选取的因素合理，模型偏差可控。从总体来看，除草机在不同作业速度和上述作业条件下都可以保持较高性能，整体适应性较强。

3.3.2 回归模型建立

依据表 7 结果，利用 Design-Expert 10 软件对数据进行多元回归拟合分析，为探究除草作业因素之间的完整耦合联系，建立了二次多项式回归模型，模型方程为

$$\begin{aligned} Y_1 &= 83.58 - 5.54E - 0.88U + 8.70G - 1.08EU + \\ &\quad 1.19EG - 2.91UG - 4.50E^2 + 0.49U^2 - 2.94G^2 \\ Y_2 &= 26.92 - 1.52E - 1.60U + 12.69G - 0.73EU + \\ &\quad 2.78EG - 2.52UG - 3.92E^2 + 2.01U^2 - 1.09G^2 \end{aligned} \tag{10}$$

利用 Origin 2021 绘制各评价指标随着回转半径、作业倾角和作业速度的响应曲面，如图 9 所示。

由图 9a 可得，当作业倾角不变时，随着回转半径增加，土壤扰动量呈先增大再减小趋势；由图 9b 得，当回转半径不变时，随着作业速度增加，土壤扰动量不断增大，当作业速度不变时，随着回转半径增加，土壤扰动量呈先增大再减小变化趋势，土壤扰动量最高达到 90.66%；由图 9c 可得，当作业倾角不变时，随着作业速度增加，土壤扰动量呈不断增大趋势；由图 9d 可得，当回转半径不变时，随着作业倾角

表 8 回归方程方差分析

Tab. 8 Analysis of variance of regression equations

方差来源	土壤扰动量				秸秆覆盖率			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	1 029.76	9	7.76	0.006 6 **	1 479.05	9	5.21	0.020 4 *
E	245.64	1	16.66	0.004 7 **	18.48	1	0.59	0.469 1
U	6.21	1	0.42	0.537 0	20.58	1	0.65	0.446 0
G	605.87	1	41.08	0.000 4 **	1 287.53	1	40.80	0.000 4 **
EU	4.69	1	0.32	0.590 5	2.13	1	0.068	0.802 4
EG	5.66	1	0.38	0.555 1	30.80	1	0.98	0.356 1
UG	33.87	1	2.30	0.173 4	25.45	1	0.81	0.399 0
E^2	85.25	1	5.78	0.047 2 *	64.84	1	2.05	0.194 9
U^2	0.99	1	0.067	0.802 9	16.96	1	0.54	0.487 4
G^2	36.33	1	2.46	0.160 5	5.02	1	0.16	0.701 9
残差	103.24	7			220.91	7		
失拟项	85.37	3	6.37	0.052 8	31.45	3	0.22	0.877 2
误差	17.86	4			189.46	4		
总和	1 133.00	16			1 699.96	16		

注：* 表示显著（$0.01 \leqslant P \leqslant 0.05$），** 表示极显著（$P < 0.01$）。

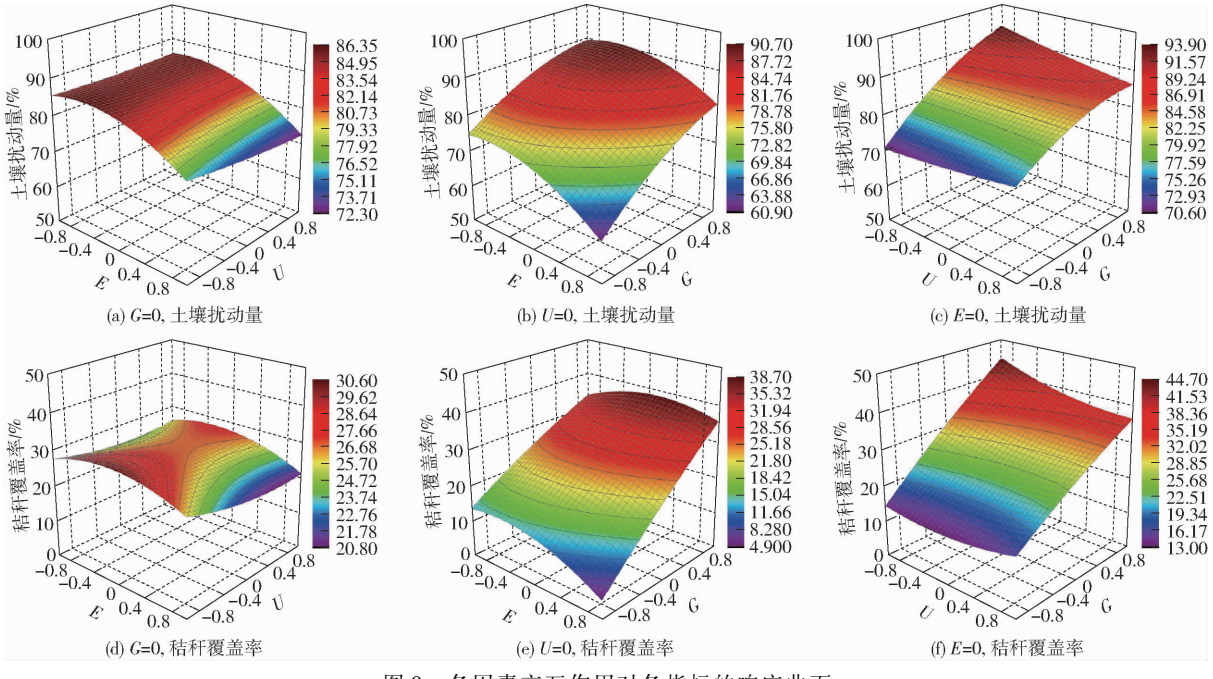


图 9 各因素交互作用对各指标的响应曲面

Fig. 9 Response surfaces plots of interaction of factors on each indicator

增加，秸秆覆盖率呈先减小再增大趋势，当作业倾角不变时，随着回转半径增加，秸秆覆盖率呈先增大再减小趋势；由图 9e 可得，当回转半径不变时，随着作业速度增加，秸秆覆盖率呈不断增大趋势，当作业速度不变时，随着回转半径增加，秸秆覆盖率呈现先增大再减小趋势，秸秆覆盖率最高达到 38.62%；由图 9f 可得，当作业倾角不变时，随着作业速度增加，秸秆覆盖率呈不断增大趋势。

3.3.3　最佳参数优化

为得到大豆行间驱拨组合式除草机高速作业时最优参数组合，利用 Design-Expert 10 软件中的 optimization numerical 进行优化，以 Y_1 和 Y_2 最大为目标，结合边界条件建立约束方程为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \max Y_2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant E \leqslant 1 \\ -1 \leqslant U \leqslant 1 \\ -1 \leqslant G \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{11}$$

通过多目标优化求解，得最佳参数组合为：回转半径 140 mm、作业倾角 50°和作业速度 6.94 km/h，此时，土壤扰动量为 87.01%，秸秆覆盖率为 26.07%。为验证所得到的最佳参数作业条件下拨秸除草效果，进行耦合仿真试验，分析单次完整作业过程中秸秆和土壤颗粒的运动情况。在 0.25 s 时，周向锯齿式拨抛清秸装置将秸秆后抛与曲率弹杆除草铲相互作用，除草铲触土与土壤产生扰动，土壤颗粒沿刀刃两侧运动，在 0.5 s 时，整机完成单次除草作业，从动态仿真中验证了所提出协同除草理论的作业情况，如图 10 所示。

由图 10a 可得，周向锯齿式拨抛清秸装置将秸秆后抛，秸秆颗粒有向刀刃上方的运动趋势，前方曲率弹杆除草铲刀刃完全触土产生扰动，后方曲率弹杆除草铲刀刃部分触土，观察土壤颗粒运动趋势得，较浅层土壤颗粒沿垂直于刀刃曲线方向运动，深层土壤颗粒与浅层颗粒发生碰撞进一步产生扰动，运动方向发生偏移且运动速度较缓；由图 10b 可得，秸秆运动趋势由于秸秆与土壤、秸秆与装置之间的碰撞发生变化，但整体依旧在刀刃上方运动，部分秸秆有向草土分离轮后的运动趋势，同时草土分离轮进一步对土壤产生扰动，土壤颗粒沿抛土面跟随草土分离轮做圆周运动。从耦合仿真结果可得，大豆行间驱拨组合式除草机通过清秸装置-除草铲-草土分离轮协同作业机制，能够解决黄淮海地区秸秆覆盖容易堵塞、草土易黏连问题，为后续田间性能试验提供理论依据。

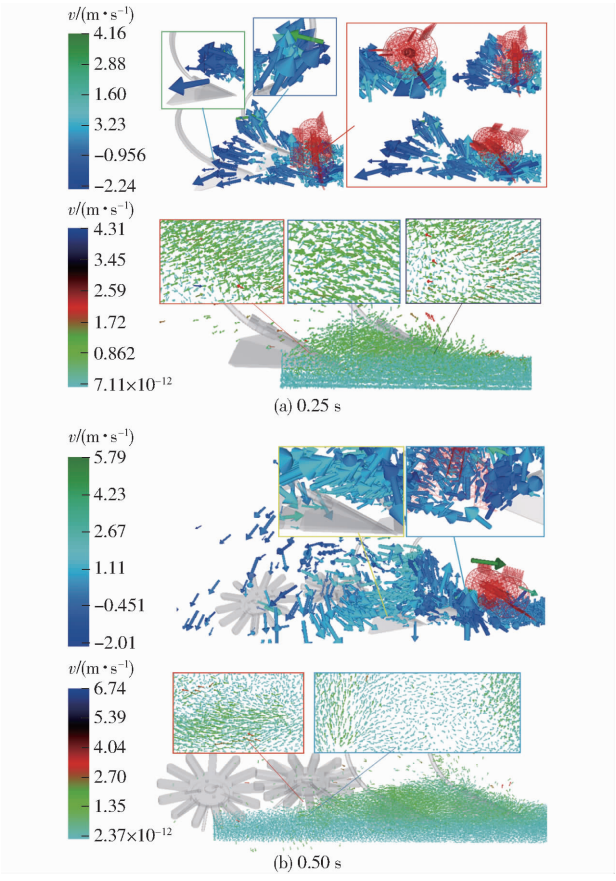


图 10　不同时刻秸秆和土壤颗粒运动趋势

Fig. 10　Trend of straw and soil particle movement at different moments

4　田间性能试验

4.1　试验条件和指标

为验证理论计算和仿真优化设计后的机具性能，在河南农业大学与河南省农业科学院试验田开展了田间试验，试验地区属黄淮海地区冬小麦-夏大豆轮作，前茬作物为小麦，收获时秸秆粉碎还田，作业效果如图 11 所示。

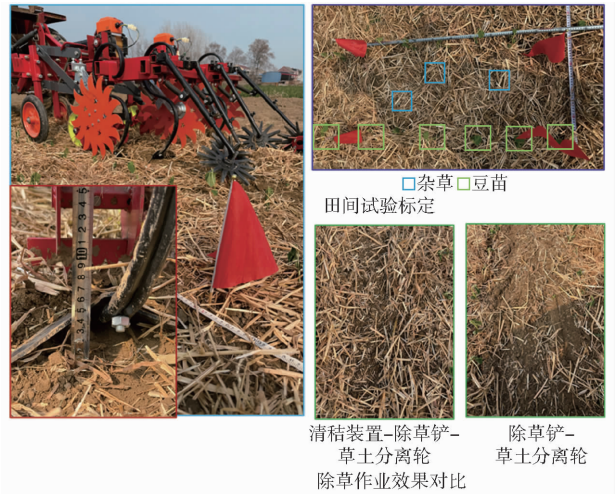


图 11　田间试验作业

Fig. 11　Field test operational map

为了满足免耕机械除草时提高行间除草率,解决因秸秆堵塞伤苗、草土黏连易再生问题,因此将除草率、伤苗率和秸秆覆盖率作为试验评价指标[23-24],试验参照文献[23]。

4.2 试验方法

结合上述的理论分析与仿真试验,分别进行清秸装置-除草铲-草土分离轮和除草铲-草土分离轮协同作业对照试验,试验田大豆行距为 40 cm,株距为 15 cm,平均秸秆覆盖量为 0.82 kg/m^2,秸秆含水率为 17.8%,土壤含水率为 20.8%。测区长度为 8 m、宽度为 1 m,每行测区随机选择 5 个长度 1 m、宽度 40 cm 的采样点进行框定,测定测区内作业前后杂草与豆苗株数以及秸秆质量变化,每组作业速度试验 3 次取平均值。

由表 9、10 可得,2 种作业模式下平均除草率、平均伤苗率和平均秸秆覆盖率差异明显。在除草铲-草土分离轮协同作业模式下,因秸秆堆积造成的伤苗率较高,除草率较低;在清秸装置-除草铲-草土分离轮协同作业模式下,平均除草率均不小于 89.08%,平均伤苗率均不大于 5.51%,周向锯齿式拨抛清秸装置作业效果明显。2 种作业模式在不同作业速度条件下平均伤苗率分别为 4.65% 和 16.95%,平均秸秆覆盖率分别为 43.43% 和 17.20%,能够实现将秸秆拨抛至除草铲后方的需求,解决了秸秆堵塞导致伤苗的问题。田间试验结果表明,应根据秸秆覆盖量和作业速度调整清秸装置转速。随着作业速度增大,除草率和伤苗率均呈不断增大趋势,秸秆覆盖率呈不断减小趋势,其原因是随着作业速度增加,土壤扰动层和秸秆堆积层厚度和面积随之增大,将根茎偏深杂草除掉同时会出现埋苗现象,最终造成除草率和伤苗率上升、秸秆覆盖率下降,与仿真试验中土壤扰动率和秸秆覆盖率变化相一致。田间作业实际作业时,应根据秸秆覆盖量和作业速度调整清洁装置转速。

表 9 清秸装置-除草铲-草土分离轮协同作业结果

Tab.9 Evaluation of synergistic operation of straw clearing devices - weeding shovel - grass - soil separating wheel

作业速度/(km·h^{-1})	试验序号	杂草数/株	大豆苗数/株	作业前秸秆质量/g	除草数/株	伤苗数/株	作业后秸秆质量/g	除草率/%	伤苗率/%	秸秆覆盖率/%	平均除草率/%	平均伤苗率/%	平均秸秆覆盖率/%
3	1	12	60	1 383	11	2	791	91.67	3.33	57.19	89.08	3.66	51.25
	2	18	67	1 722	16	3	743	88.89	4.48	43.15			
	3	15	63	1 526	13	2	815	86.67	3.17	53.41			
5	1	17	70	1 754	16	3	682	94.12	4.29	38.88	91.49	4.79	42.65
	2	14	70	1 443	13	5	664	92.86	7.14	46.02			
	3	16	68	1 501	14	2	646	87.50	2.94	43.04			
7	1	15	70	1 682	14	5	548	93.33	7.14	32.58	93.31	5.51	36.38
	2	14	64	1 648	13	3	585	92.86	4.69	35.50			
	3	16	64	1 493	15	3	613	93.75	4.69	41.06			

表 10 除草铲-草土分离轮协同作业结果

Tab.10 Evaluation of weeding shovel - grass soil separation wheel co-operation

作业速度/(km·h^{-1})	试验序号	杂草数/株	大豆苗数/株	作业前秸秆质量/g	除草数/株	伤苗数/株	作业后秸秆质量/g	除草率/%	伤苗率/%	秸秆覆盖率/%	平均除草率/%	平均伤苗率/%	平均秸秆覆盖率/%
3	1	13	64	1 819	11	5	415	84.62	7.81	22.81	82.74	10.56	23.27
	2	17	68	1 625	14	8	386	82.35	11.76	23.75			
	3	16	66	1 484	13	8	345	81.25	12.12	23.25			
5	1	16	68	1 723	13	8	367	81.25	11.76	21.30	83.83	15.98	16.41
	2	13	68	1 540	11	11	242	84.53	16.18	15.71			
	3	14	60	1 646	12	12	201	85.71	20.00	12.21			
7	1	13	66	1 447	12	13	243	92.31	19.70	16.79	88.23	24.31	11.93
	2	15	60	1 749	13	16	168	86.67	26.67	9.61			
	3	14	64	1 861	12	17	175	85.71	26.56	9.40			

5 结论

(1)提出驱动拨秸和被动分离草土的协同作业方法,对周向锯齿式拨抛清秸装置和草土分离轮与杂草和秸秆相互作用进行了理论分析,设计了一种具备周向锯齿式拨秸与协作分离草土功用的大豆行间驱拨组合式除草机。

(2)对周向锯齿式拨抛清秸装置进行了 EDEM

仿真优化，采用三因素三水平正交试验，通过极差分析确定了最佳作业参数；利用 MBD－DEM 耦合仿真试验对除草机整体作业过程进行模拟，以土壤扰动量和秸秆覆盖率为评价指标，得到最佳参数组合为：回转半径 140 mm、作业倾角 50°、作业速度 6.94 km/h，此时，土壤扰动量为 87.01%，秸秆覆盖率为 26.07%。

(3)清秸装置-除草铲-草土分离轮和除草铲-草土分离轮协同作业的 2 种田间对照试验结果表明，周向锯齿式拨抛清秸装置作业效果明显，机具作业性能稳定。随着作业速度的增加，土壤扰动量增大导致除草率和伤苗率提高，但同时秸秆覆盖率降低，当作业速度为 7 km/h 时，除草率、伤苗率和秸秆覆盖率平均值分别为 93.31%、5.51% 和 36.38%，满足大豆苗期行间除草作业农艺和技术要求。

参 考 文 献

[1] 邱野，王瑄. 耕作模式对坡耕地土壤水分和大豆产量的影响[J]. 农业工程学报，2018，34(22)：128－137.
QIU Ye, WANG Xuan. Effects of tillage patterns on soil moisture and soybean yield in sloping fields[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 128－137. (in Chinese)

[2] 李庆伦，金诚谦，印祥，等. 黄淮海地区大豆品种生物及力学特性研究[J]. 农机化研究，2021，43(4)：185－190.
LI Qinglun, JIN Chengqian, YIN Xiang, et al. Study on biological and mechanical properties of some soybean varieties in Huang－Huai－Hai region[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(4): 185－190. (in Chinese)

[3] 徐彩龙，韩天富，吴存祥. 黄淮海麦茬大豆免耕覆秸精量播种栽培技术研究[J]. 大豆科学，2018，37(2)：197－201.
XU Cailong, HAN Tianfu, WU Cunxiang. No-tillage plus straw mulching and precise sowing cultivation technology research for soybean after winter wheat in Huang－Huai－Hai region[J]. Soybean Science, 2018, 37(2): 197－201. (in Chinese)

[4] HOU Shouyin, ZHU Yifan, ZHU Xiaoxin, et al. Design and experiment of a straw clearing mulching no-tillage planter[J]. Biosystems Engineering, 2022, 221: 69－80.

[5] SAPUNII S, KARUNA K. Development and field performance assessment of roller rake weeder[J]. Crop Protection, 2025, 189: 107051.

[6] NARENDRA S, ABHILASH K. An integrated inter- and intra-row weeding system for row crops[J]. Crop Protection, 2021, 145: 105642.

[7] MICHAEL M, MARCUS M, DANIEL D, et al. Development and evaluation of a sensor-based slope-compensation system for camera-guided hoeing in maize[J]. Biosystems Engineering, 2024, 247: 91－96.

[8] 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: 2136.

[9] 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: 109519.

[10] JIA W, TAI K, WANG X, et al. Design and simulation of intra-row obstacle avoidance shovel-type weeding machine in orchard[J]. Agriculture, 2024, 14: 1124.

[11] 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)

[12] 李霞，郭宪峰，庞俊娜. 黄淮海地区夏大豆“精简化”高产高效栽培技术[J]. 农业科技通讯，2020(9)：275－276.

[13] YANG Siyu, CHEN Chang, YANG Yijiang, et al. Differential responses of weeds and rice to shading stress from oilseed rape straw mulch[J]. Crop Protection, 2025, 189: 107038.

[14] 李鑫. 单驱双动式免耕播种机清秸防堵装置设计与试验[D]. 淄博：山东理工大学，2023.
LI Xin. Design and experiment of row cleaner with straw cleaning disc single-drive double-acting type for no-till planter[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023. (in Chinese)

[15] 曹鑫鹏，王庆杰，李洪文，等. 玉米免耕播种机侧置切刀与拨茬齿盘组合清茬装置研究[J]. 农业机械学报，2021，52(3)：36－44.
CAO Xinpeng, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Combined row cleaners research with side cutter and stubble clean disk of corn no-till seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 36－44. (in Chinese)

[16] 张喜瑞，杨幼铭，刘宏新，等. 双定刀滑切防缠式香蕉秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(2)：36－49.
ZHANG Xirui, YANG Youming, LIU Hongxin, et al. Optimal design and experiment of double fixed knife slip-cutting and anti-tangle banana straw crushing and returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 36－49. (in Chinese)

[17] MA Xuedong, GUO Bingjiang, LI Lingling. Simulation and experiment study on segregation mechanism of rice from straws under horizontal vibration[J]. Biosystems Engineering, 2019, 186: 1－13.

[18] WEN Changkai, ZHANG Jing, ZHENG Kan, et al. Accelerated verification method for the reliability of the motor drive mechanism of the corn precision seed-metering device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 212: 108163.
[19] ZENG Zhiwei, CHEN Ying. Simulation of straw movement by discrete element modelling of straw-sweep-soil interaction[J]. Biosystems Engineering, 2019, 180: 25 - 35.
[20] 毕津硕,卢彩云,李洪文,等. 基于最优动态滑切的被动式锯齿圆盘防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(4):118 - 128.
BI Jinshuo, LU Caiyun, LI Hongwen, et al. Design and experiment of anti-blocking device passive sawtooth disc based optimal dynamic sliding cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 118 - 128. (in Chinese)
[21] 何进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报,2018,49(4):1 - 19.
HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1 - 19. (in Chinese)
[22] 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 Haokai. Design and test of mechanochemical composite maize weeder[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022. (in Chinese)
[23] 中国农业机械化科学研究院耕作种植机械研究所. 早田中耕追肥机试验方法: JB/T 7864—1999[S]. 北京:中国标准出版社,1999.
[24] 韩豹,郭畅,高英玲,等. 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 Bao, GUO Chang, GAO Yingling, et al. 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)

(上接第 334 页)

[21] SUBARI M A, HUDHA K, KADIR Z A, et al. Development of path tracking control of a tracked vehicle for an unmanned ground vehicle[J]. International Journal of Advanced Mechatronic Systems, 2020, 8(4): 136 - 143.
[22] 乔宝山,冯樱,江子旺,等. 基于模型预测控制的智能汽车轨迹跟踪方法比较[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2020, 34(2):24 - 28.
QIAO Baoshan, FENG Ying, JIANG Ziwang, et al. Comparison of intelligent vehicle trajectory tracking methods based on model predictive control[J]. Journal of Hubei University of Automotive Industry, 2020, 34(2): 24 - 28. (in Chinese)
[23] WANG Y, BOYD S. Fast model predictive control using online optimization[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(2): 267 - 278.
[24] 王玉亮,李汉卿,陈兆英,等. 基于 MPC 的插秧机路径跟踪控制算法研究[J]. 中国农机化学报, 2022,43(7):173 - 178.
WANG Yuliang, LI Hanqing, CHEN Zhaoying, et al. Research on path tracking control algorithm of rice transplanter based on MPC[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(7): 173 - 178. (in Chinese)
[25] 迟瑞娟,熊泽鑫,姜龙腾,等. 基于模型预测的插秧机路径跟踪控制算法[J]. 农业机械学报, 2022,53(11):22 - 30, 99.
CHI Ruijuan, XIONG Zexin, JIANG Longteng, et al. Path tracking control algorithm of transplanter based on model prediction [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 22 - 30, 99. (in Chinese)
[26] 徐广飞,陈美舟,苗河泉,等. 基于模型预测控制的农机主从跟随作业控制方法[J]. 农业机械学报, 2020,51(增刊 2): 11 - 20.
XU Guangfei, CHEN Meizhou, MIAO Hequan, et al. Following operation control method of farmer machinery based on model predictive control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 11 - 20. (in Chinese)
[27] LI Y H, FAN J K, LIU Y, et al. Path planning and path tracking for autonomous vehicle based on MPC with adaptive dual-horizon-parameters[J]. International Journal of Automotive Technology, 2022, 23(5): 1239 - 1253.
[28] 严国军,贲能军,顾建华,等. 基于 MPC 的无人驾驶拖拉机轨迹跟踪控制[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019,38(9):1 - 6.
YAN Guojun, BEN Nengjun, GU Jianhua, et al. Trajectory tracking control of unmanned tractors based on MPC[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science Edition), 2019, 38(9): 1 - 6. (in Chinese)
[29] 盖江涛,刘春生,马长军,等. 考虑履带滑转滑移的电驱动履带车辆转向控制[J]. 兵工学报, 2021,42(10):2092 - 2101.
GAI Jiangtao, LIU Chunsheng, MA Changjun, et al. Steering control of electrically driven tracked vehicles considering track slip[J]. Journal of Ordnance Engineering, 2021, 42(10): 2092 - 2101. (in Chinese)
[30] 闫清东,张连第,赵毓芹,等. 坦克构造与设计[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2007.