

桑园立式旋转动力耙优化设计与试验

杨庆璐^{1,2} 律政文¹ 闫银发^{1,3} 杨 硕¹ 李法德^{1,4} 宋占华^{1,5} 陈玉军⁶

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省设施园艺智慧生产技术装备重点实验室(筹), 泰安 271018;
3. 农业装备智能化山东省工程研究中心, 泰安 271018; 4. 农业生产机械装备国家工程研究中心, 泰安 271018;
5. 江西省农业技术推广中心, 南昌 330046; 6. 潍坊海林机械有限公司, 潍坊 261021)

摘要: 桑园耕整地作业是提高桑叶产量的重要基础,根据桑园种植模式和耕整地作业要求,设计了一种适用于桑园的立式旋转动力耙。根据桑园种植模式和耕整地农艺要求确定了动力耙整机结构,通过对耙刀作业过程理论计算和运动学分析,确定耙刀结构参数。利用离散元法对动力耙作业过程进行仿真,分析不同外倾角对耙刀所受扭矩和作业质量的影响以及耙刀作业过程中所受扭矩的变化规律。选取转子转速、前进速度、耙深为试验因素,以碎土率、耙后地表平整度、土壤容重为试验指标,进行了三因素三水平正交旋转组合田间试验。试验结果表明:转子转速和前进速度对碎土率、耙后地表平整度和土壤容重的影响极显著;耕深仅对碎土率的影响显著,对耙后地表平整度和土壤容重均无显著影响。优化计算得到作业参数最优组合:转子转速为 350 r/min、前进速度为 0.7 m/s、耕深为 20 cm,此时碎土率为 97.89%,耙后地表平整度为 11.04 mm,土壤容重为 1.11 g/cm³。以优化得到的作业参数组合进行验证试验,得到碎土率为 97.29%,耙后地表平整度为 11.53 mm,土壤容重为 1.07 g/cm³,与优化得到的结果一致,满足作业要求。

关键词: 桑园耕整地; 动力耙; 离散元仿真; 优化设计

中图分类号: S222.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2025)01-0210-11

OSID:



Optimization Design and Experiment of Vertical Rotary Harrow for Mulberry Plantation

YANG Qinglu^{1,2} LÜ Zhengwen¹ YAN Yinfa^{1,3} YANG Shuo¹ LI Fade^{1,4} SONG Zhanhua^{1,5} CHEN Yujun⁶

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Key Laboratory of Intelligent Production Technology and Equipment for Facility Horticulture, Taian 271018, China
3. Shandong Engineering Research Center of Agricultural Equipment Intelligentization, Taian 271018, China
4. National Engineering Research Center for Agricultural Production Machinery and Equipment, Taian 271018, China
5. Agricultural Technology Promotion Center of Jiangxi Province, Nanchang 330046, China
6. Weifang Hailin Machinery Co., Ltd., Weifang 261021, China)

Abstract: The cultivation and land preparation work in mulberry plantations is the important foundation for improving mulberry leaf yield. Based on the mulberry planting mode and the requirements of cultivation and land preparation work, a vertical rotating rotary harrow suitable for mulberry plantations was designed and optimized. According to the mulberry plantation planting and cultivation requirements to determine the rotary harrow machine structure, through the theoretical analysis of the harrow knife operation process and kinematic analysis, the harrow knife structure parameters were determined. Using the discrete element method to simulate the rotary harrow operation process, and the influence of different camber angles on the torque of the harrow knife and working quality of the machine and the variation law of the torque during the harrow operation were analyzed. Taking rotor speed, forward speed and plowing depth as test factors, and taking soil breakage rate, surface flatness after harrowing and soil weight as test indexes, a three-factor, three-level orthogonal rotary combination field test was carried out to analyze the

收稿日期: 2024-10-15 修回日期: 2024-11-06

基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-18-ZJ0402)和山东省现代农业产业技术体系建设项目(SDAIT-18-06)

作者简介: 杨庆璐(1990—),男,副教授,博士,主要从事现代农业装备与计算机测控研究,E-mail: yangqinglu@sdau.edu.cn

通信作者: 宋占华(1984—),男,教授,博士,主要从事现代农业机械设计及理论研究,E-mail: songzh6688@163.com

influence of each factor on the operational effect of rotary harrow. The test results showed that the rotor speed and forward speed on the soil breakage rate, harrowing surface flatness and soil weight was very significant; the effect of plowing depth was only significant on the soil breakage rate, and there was no significant effect on the harrowing surface flatness and soil weight. The optimal combination of operating parameters was calculated as follows: rotor speed was 350 r/min, forward speed was 0.7 m/s, plowing depth was 20 cm, soil fragmentation rate was 97.89%, surface flatness was 11.04 mm after harrowing, and soil capacity was 1.11 g/cm³. The verification test was carried out with the optimized operation parameter combination, and the soil breakage rate was 97.29%, surface flatness after harrowing was 11.53 mm, soil capacity was 1.07 g/cm³, which was consistent with the optimized results, and it met the operational requirements.

Key words: mulberry plantation tillage and soil preparation; rotary harrow; discrete element simulation; optimization design

0 引言

随着桑树种植业发展和桑叶、桑果市场需求增加,推进蚕桑产业机械化变得尤为重要^[1]。桑园行间耕整地作业能够改善土壤透气性,提升蓄水保墒能力,促进桑树发芽和生长,提高桑叶产量和质量。目前,桑园耕整地机械主要有铧式犁、深松机、动力耙、旋耕机等^[2-3]。其中,立式旋转动力耙采用立轴驱动作业方式,具有传动性能好、作业深度一致性好和土壤水平扰动小等优点^[4]。

目前动力耙在国外已经得到广泛应用,多用于耕后整地^[5-6]。德国雷肯 Zirkon 10 系列动力驱动耙,可通过改变耙刀旋转方向适应灭茬和苗床整地作业;意大利伊诺罗斯农业机械有限公司 ALPEGO 动力耙采用“碎土 + 平土 + 镇压”的一体式作业方式,作业一次即可达到待播状态;意大利必圣士公司设计了一款小型动力耙,可用于小型分散的地块及丘陵地带。

相较于卧式旋耕机,国内对动力耙研究较少。王英博等^[7]设计了一款立式驱动浅旋耙,通过分析耙刀作业过程运动学和动力学,得出机具前进速度及转子转速为影响其受力的主要因素。ZHAI 等^[8]利用 EDEM 软件对立式旋耕机不同运行参数和结构参数进行仿真模拟,分析其作业参数、刀具弯曲角度、刀具安装数量对作业效果的影响。CHEN 等^[9]设计了一种立式旋耕定层施肥机,并通过 EDEM 仿真与田间试验相结合的方法,验证了垂直旋耕相比于传统卧式旋耕对土壤扰动更小,可有效提高土壤抗侵蚀能力。

现有微耕机、多功能管理机等多为卧式旋耕机,其在较硬或未经耕作的土壤上作业时易发生弹跳,导致旋耕刀不能成功穿透土壤,作业较浅,而动力耙在未经耕作的土壤上作业时仍能达到其最大耕深,其碎土效果也优于卧式旋耕机^[5],且卧式旋耕机作

业过程中旋耕刀会将底层土壤抛掷到土壤表面,破坏耕作层土壤结构,作业后地表起伏大,平整度差。基于桑园行间耕整地需求,本文根据桑园种植模式和耕整地作业要求,设计一种桑园立式旋转动力耙,以提高桑园耕整地作业质量。

1 整机结构与工作原理

桑树树形如图 1a 所示,桑树主干树拳距离地表高度一般大于 35 cm,且由树拳生发的枝条呈倒锥型,以主干为中心向四周生长。因此,当垂直于耕整机械前进方向靠近桑树主干距离 l 为 30 cm 时,机具离地面高度 h 应小于 35 cm,如图 1b 所示。由图 1 可知,动力耙在桑树行间作业通过性较好,机具两端可接近桑树主干作业而不损伤树拳,相较于卧式旋耕机,动力耙作业时不会打乱土层,作业后地表平整度更高,且不会产生犁底层,更适宜于桑园等深根系作物耕整地作业。

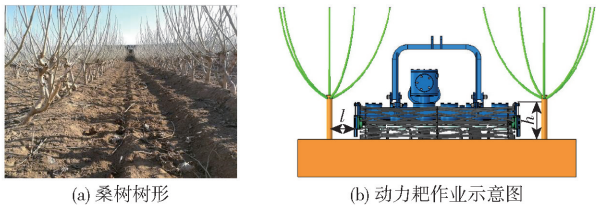


图 1 桑园动力耙耕整方案

Fig. 1 Rotary harrow cultivation plan in mulberry plantation

桑园动力耙主要包括齿轮箱、变速箱、耙刀刀组、限深镇压辊、三点悬挂架等,整机结构如图 2 所示。作业时,拖拉机动力输出轴通过万向节将动力传输至变速箱,再由花键套将动力传输至齿轮箱,主传动轴通过齿轮将动力传递到两侧其他传动轴,从而带动动力耙刀组旋转,完成耕整作业。

动力耙传动示意图如图 3 所示,拖拉机动力输出轴输出的动力经由齿轮箱由水平方向转动转换为竖直方向转动,带动动力耙耙刀刀组旋转,其中,变

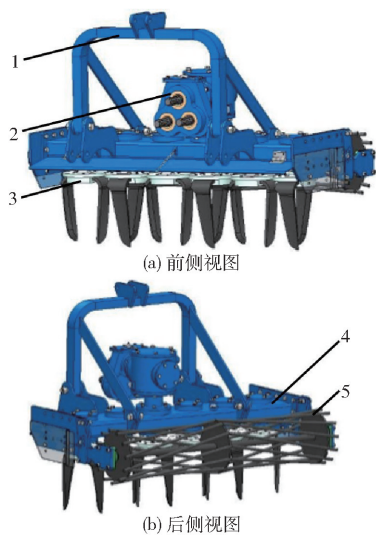


图2 动力耙整机结构示意图

Fig.2 Schematics of rotary harrow

1. 三点悬挂架 2. 变速箱 3. 耙刀刀组 4. 齿轮箱 5. 限深镇压辊

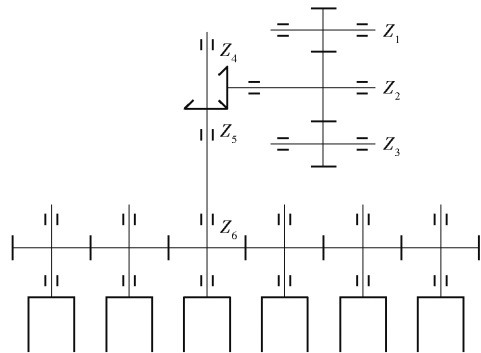


图3 动力耙传动示意图

Fig.3 Schematic of rotary harrow transmission

速箱设有 3 个输入轴,可实现耙刀刀组不同转速调整。参照文献[10],动力耙耙刀刀组转速一般不超过 400 r/min,拖拉机动力输出轴转速一般为 540、720 r/min,因此,设计时选定齿轮齿数分别为: $Z_1 = 25$, $Z_2 = 29$, $Z_3 = 21$, $Z_4 = 14$, $Z_5 = 20$, $Z_6 = 50$ 。拖拉机不同输出轴转速下,动力耙耙刀刀组转速计算式为

$$n_1 = 540 \frac{Z_1 Z_4}{Z_2 Z_5} \tag{1}$$

$$n_2 = 540 \frac{Z_4}{Z_5} \tag{2}$$

$$n_3 = 540 \frac{Z_3 Z_4}{Z_2 Z_5} \tag{3}$$

根据桑园种植农艺要求,桑园土地耕整作业深度为 100 ~ 200 mm,由此确定动力耙主要技术参数如表 1 所示。

2 关键部件设计

2.1 刀组结构及排列方式

耙刀是动力耙的重要作业部件,其结构参数直

表 1 桑园动力耙主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters for rotary harrow in mulberry field

参数	数值
整机长×宽×高/(mm×mm×mm)	930×1 316×1 013
作业幅宽/mm	1 200
作业深度/mm	0 ~ 200
耙刀数量	12
转子转速/(r·min ⁻¹)	274、326、378
作业速度/(m·s ⁻¹)	0 ~ 2
整机质量/kg	330
配套动力/kW	40

接影响动力耙工作质量和作业功耗。动力耙刀组设计需考虑刀组作业幅宽、相邻耙刀重复作业区域宽度以及耙刀的空间结构^[11-12]。刀组由上刀盘、下刀盘、耙刀、内六角螺栓及固定销组成,结构如图 4 所示。为保证动力耙作业时不漏耕且稳定可靠,刀组排列方式如图 5 所示。为避免在作业过程中相邻转子上的耙刀互相碰撞,相邻转子耙刀安装角为 90°,为避免漏耕,转子上耙刀回转直径为 210 mm,相邻转子间中心距为 200 mm。

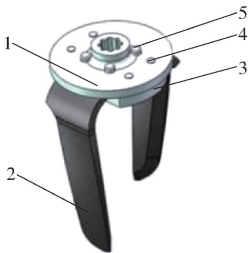


图4 刀组结构示意图

Fig.4 Schematic of knife group

1. 上刀盘 2. 耙刀 3. 下刀盘 4. 内六角螺栓 5. 固定销

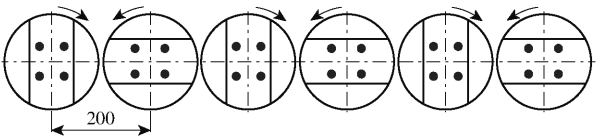


图5 刀组排列示意图

Fig.5 Schematic of knife group arrangement

2.2 耙刀结构参数与运动学分析

耙刀结构参数如图 6a 所示,为保证耙刀切削刃强度,耙刀刃面前端非切削刃厚度取为 5 mm。根据刀盘尺寸及转子安装中心距,避免漏耕、碰撞情况发生,取耙刀宽度为 90 mm,厚度为 15 mm。桑园作业要求耕深为 100 ~ 200 mm,因此取耙刀高度为 280 mm,其中切削刃长度取 215 mm。耙刀外倾角如图 6b 所示,点 O 为转子回转中心,点 A 为耙刀刀背外侧一点,点 B 为耙刀刀刃外侧切土点,R 为耙刀切削刃距转子中心轴回转中心点 O 距离, δ 为耙刀宽度对应的圆心角, β 为耙刀外倾角。

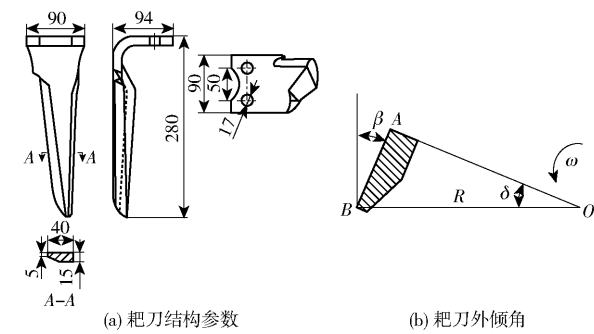


图6 耙刀结构示意图

Fig.6 Schematics of harrow knife

选取单个动力耙回转中心为坐标原点,以动力耙作业时前进方向为 x 轴,垂直于前进方向为 y 轴,建立坐标系。耙刀运动轨迹如图 7 所示,耙刀绝对运动由沿动力耙前进方向直线运动和随转子旋转圆周运动合成。耙刀切削刃上各点运动轨迹表示为

$$\begin{cases} x = R\cos(\omega t) + v_m t \\ y = -R\sin(\omega t) \end{cases} \quad (4)$$

式中 v_m ——机组前进速度, m/s
 ω ——耙刀回转角速度, rad/s
 t ——时间, s

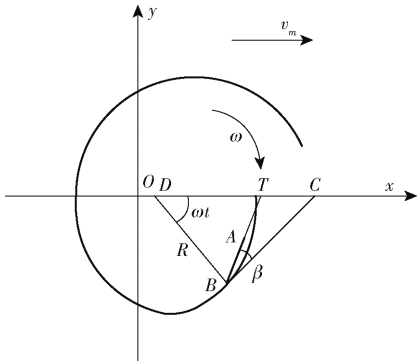


图7 耙刀运动分析示意图

Fig.7 Kinematic analysis for harrow knife

查阅文献[13],耙刀切削刃回转切线速度与机组前进速度比称为耙刀作业速比 λ ,计算式为

$$\lambda = \frac{R\omega}{v_m} \quad (5)$$

为保证动力耙作业不漏耕,土壤破碎效果好,耕后地表平整, λ 取 1~4。

为探究不同速比下动力耙耙刀运动轨迹,利用 ADAMS 运动学分析软件对动力耙作业过程进行仿真。选取相向转动两相邻转子为研究对象,耙刀切削刃距转子中心轴距离 R 为 105 mm,转子前进速度设为 1 m/s,转子转速分别取 90.99、181.98、272.98、363.97 r/min,对应转子速比 λ 为 1、2、3、4,仿真结果如图 8 所示。如图 8b 所示,将同一个转子上单个耙刀运动轨迹的重叠区域定义为耕作区,同

一转子上两个耙刀相邻两耕作区之间区域定义为未耕区。由图 8 可知,随速比 λ 增大,耙刀运动轨迹线重叠区域增大,即随着 λ 增大,耕作区增大,未耕区减小。

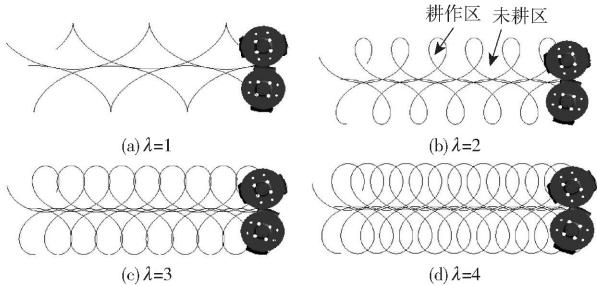


图8 不同速比下耙刀运动轨迹

Fig.8 Motion trajectory of harrow knife at different speed ratios

3 动力耙作业过程仿真

为研究动力耙外倾角参数对耙刀所受扭矩和机具作业质量的影响规律,以及耙刀所受扭矩和功耗的变化情况,利用离散元法对其作业过程进行仿真。

3.1 土壤模型建立

查阅文献[14–21],将土槽模型土壤颗粒半径设为 5.0 mm,接触半径为 5.5 mm。根据文献[22–35]确定土壤模型参数,如表 2 所示。仿真接触模型选用 Hertz–Mindlin with Bonding 模型,设仿真固定时间步长为 5×10^{-5} s, Rayleigh 时间步长为 20%。

表2 离散元模型参数

Tab.2 Parameters of discrete element model

类型	参数	数值
土壤颗粒	泊松比	0.30
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2.50×10^3
	剪切模量/Pa	1.15×10^7
耙刀	泊松比	0.30
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7.87×10^3
	剪切模量/Pa	7.90×10^{10}
土壤颗粒–土壤颗粒	恢复系数	0.43
	静摩擦因数	0.89
	滚动摩擦因数	0.45
土壤颗粒–耙刀	恢复系数	0.40
	静摩擦因数	1.15
	滚动摩擦因数	0.05
Hertz – Mindlin with Bonding 接触模型	单位面积法向粘结刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.00×10^8
	单位面积切向粘结刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	5.00×10^7
	法向临界应力/Pa	1.00×10^4
	切向临界应力/Pa	1.00×10^4
	粘结半径/mm	5.60

根据动力耙模型参数确定土槽尺寸(长×宽×高)为1 000 mm×700 mm×300 mm,并根据土壤物理特性参数建立土槽模型(图9),颗粒沉降完成后,设置生成粘结键。通过后处理模块,测量得到土壤容积密度为1.43 g/cm³,该容积密度即为耕前土壤初始容积密度。

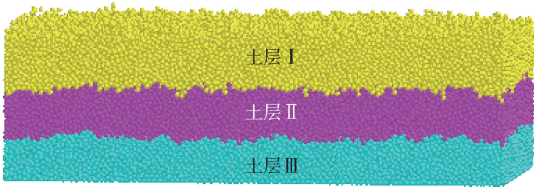


图9 离散元土槽模型

Fig.9 Discrete element soil model

3.2 评价指标测量方法

仿真试验后,通过 EDEM 后处理模块,分析计算得到地表平整度及土壤容积密度等指标。

地表平整度测量如图10所示,在垂直于转子前进方向的横向截面内,以相邻两个转子的作业幅宽为采样界限,在耕后地表最高点的上方取1条平行于地表的基准线,并将基准线四等分,测量各等分点至耕后地表距离,计算地表平整度。

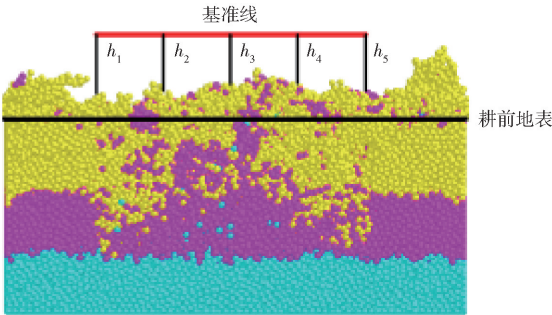


图10 地表平整度测量

Fig.10 Measurement of soil surface flatness

土壤容积密度测量:在 EDEM 后处理中,选择建立长为400 mm,宽为200 mm,以耕深深度的长方体区域,如图11所示。以长方体中土壤颗粒数量和单个颗粒质量乘积与长方体体积比作为土壤容积密度。

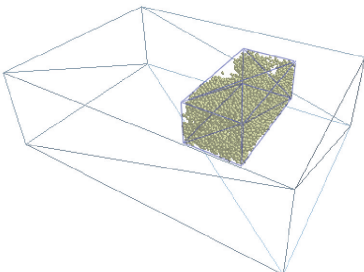


图11 容积密度测量取样

Fig.11 Sample of soil bulk density measurement

3.3 动力耙外倾角参数

耙刀外倾角是影响耙刀切削土壤效果的重要结

构参数,无外倾角耙刀在切削土壤时会造成刀背“抗土”现象,外倾角过大会增大切削阻力,加剧土壤扰动。因此,对不同外倾角耙刀进行作业过程仿真。

设转子转速为250 r/min,前进速度为1 m/s,耕深为10 cm,耙刀外倾角分别为0°、5°、10°、15°、20°、25°,利用单个转子进行仿真模拟,得到不同外倾角的耙刀在作业过程中受到的平均扭矩、耙后地表平整度及土壤容积密度。综合耙刀所受扭矩及作业质量进行分析,得到耙刀外倾角较优范围为15°~20°,在此范围内,得到平均扭矩、耙后地表平整度、土壤容积密度分别为87.22~123.13 N·m、3.64~4.56 mm、1.15~1.38 g/cm³。

3.4 转子扭矩与功耗

动力耙作业过程中转子所受扭矩及功耗是动力耙重要的经济性指标。为明确耙刀作业过程中所受扭矩和功耗的变化情况,对其作业过程进行仿真。

设转子转速为300 r/min,前进速度为1 m/s,耕深为10 cm。单个转子及其耙刀在作业过程中所受扭矩如图12a所示,由图12a可知,耙刀所受扭矩随时间延长呈现周期性变化,转子每旋转一周为一个变化周期。在时间段25.25~25.49 s内:耙刀1、耙刀2及单个转子所受扭矩最大值分别为152.87、145.98、201.65 N·m,最小值分别为19.88、24.81、113.03 N·m。由扭矩计算得到功耗随时间的变化如图12b所示,得到功耗也随着时间的延长呈周期性

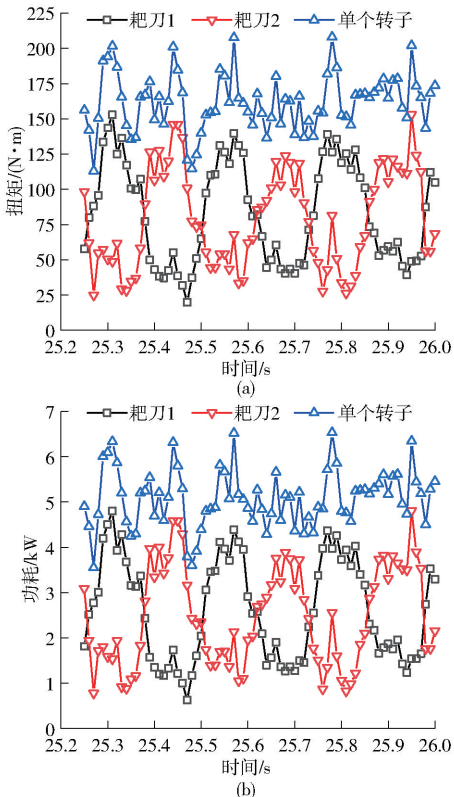


图12 扭矩和功耗变化曲线

Fig.12 Variation curves of torque and power consumption

变化,转子每旋转一周为一个变化周期,单个转子切削功耗最大值为 6.34 kW,平均值为 5.08 kW。设计的动力耙有 6 个转子,由此可得动力耙切削功耗为 30.48 ~ 38.04 kW,考虑到实际作业条件以及镇压辊阻力等因素影响,最终确定动力耙配套动力为 40 kW。

耙刀所受扭矩为最大值时,其所处位置如图 13 所

示。其中,图 13b、13c 为耙刀所受扭矩为最大值时的运动状态,耙刀处于前进方向的未切削区域,耙刀在此区域内所受扭矩主要来源于破坏土壤原始结构、破碎土壤所受的阻力;图 13a、13d 为耙刀所受扭矩为最小值时的运动状态,耙刀处于已切削区域,耙刀在此区域内所受扭矩主要来源于松碎土壤。

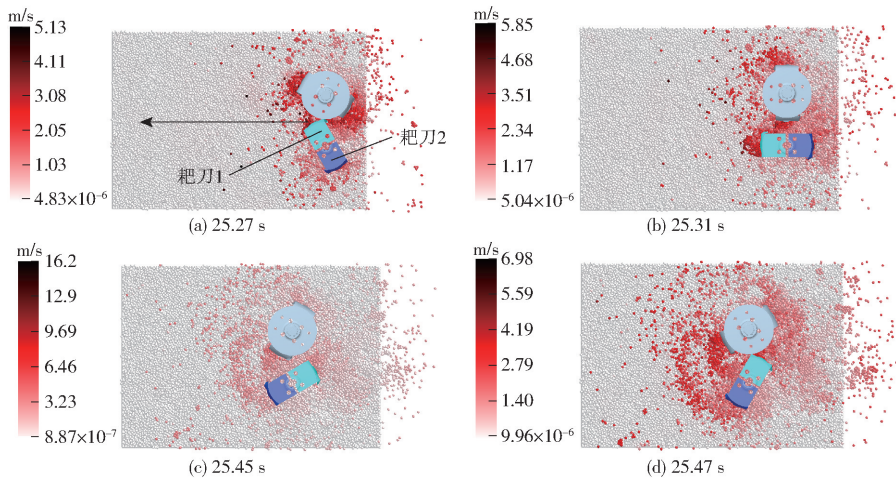


图 13 不同时刻耙刀运动状态

Fig. 13 Motion state of harrow knife at different times

4 桑园动力耙田间试验

4.1 试验材料

在潍坊海林机械有限公司试验田进行试验,试验田地表面平坦,杂草稀少,未进行春耕,试验时天气晴朗。试验地土壤情况如表 3 所示。

表 3 试验地土壤情况

Tab.3 Soil condition of test site

深度/mm	土壤含水率/ %	土壤紧实度/ kPa	土壤容重/ (g·cm ⁻³)
0 ~ 100	14.21 ± 1.73	788.18 ± 556.80	1.66 ± 0.16
100 ~ 200	16.22 ± 0.83	1 728.23 ± 107.31	1.71 ± 0.04

试验选用鲁中-554 型拖拉机(山东潍坊鲁中拖拉机有限公司)为动力耙的动力装置,拖拉机标定功率为 40.5 kW,经标定其前进速度,试验选用前进挡位为快 1 (0.7 m/s)、快 3 (1.5 m/s) 及快 4 (2.3 m/s),动力输出轴转速为 540 r/min 或 720 r/min;电子天平、环刀(内径 50.46 mm,高度 50 mm)、钢卷尺(量程 5 m,精度 1 mm)、电热干燥箱(202-2 型,上海第二五金厂)、TJSD-750-IV 型土壤紧实度仪(浙江托普仪器有限公司)、钢板尺(量程 200 mm,精度 1 mm)、试样袋等。

4.2 试验方法

耙刀作业速比对其作业质量有重要影响,且相同转速和前进速度下,耕深不同,对作业质量也会产生影响^[31]。因此,选择动力耙前进速度、转子

转速、耕深作为试验因素,试验因素编码如表 4 所示。

表 4 田间试验因素编码

Tab.4 Factors coding of field experiment

编码	因素		
	转子转速/(r·min ⁻¹)	前进速度/(m·s ⁻¹)	耕深/cm
-1	273.0	0.7	10
0	325.5	1.5	15
1	378.0	2.3	20

为提高试验的准确性,将试验地划分为加速区、匀速区、减速区,在匀速区进行数据采集,如图 14 所示。动力耙田间试验如图 15 所示。

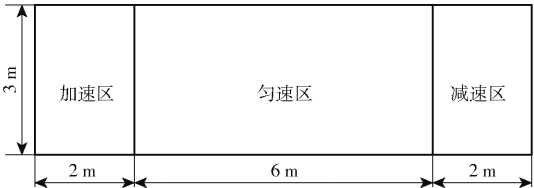


图 14 试验区域划分

Fig. 14 Test area division

4.3 试验评价指标测定方法

参照 GB/T 25420—2010《驱动耙》、NY/T 499—2013《旋耕机作业质量》规定的试验方法测定碎土率、耙后地表平整度和土壤容重。

(1) 碎土率测定

在作业后土壤表面取边长为 0.5 m 正方形测定区域,在测定区域的全耕层内,以最长边小于 5 cm

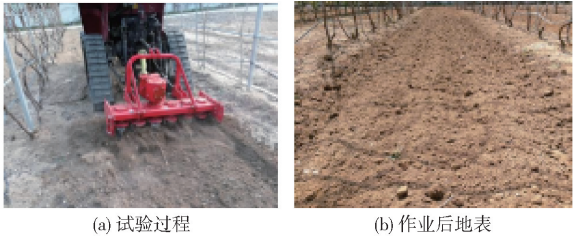


图 15 动力耙田间试验

Fig. 15 Field experiment of rotary harrow

的土块质量占土壤总质量的百分比作为碎土率,计算式为

E = (m_a / m_b) × 100% (6)

式中 E——土壤碎土率,%

m_a——区域全耕层内最长边小于 5 cm 的土块质量,kg

m_b——区域全耕层土壤质量,kg

(2) 耙后地表平整度测定

沿垂直于动力耙作业方向,在地表最高点以上取一条与地表平行的基准线,基准线长度略大于动力耙作业幅宽,将基准线分成 10 等份,测定各等分点到地表距离,计算式为

G = (sum from i=1 to m of |X_i - X_bar|) / m (7)

式中 G——耙后地表平整度,mm

X_bar——各等分点至地表距离平均值,mm

X_i——第 i 个等分点至地表距离,mm

m——等分点数量,取 11

(3) 耙后土壤容重测定

用取土环刀(内径 50.46 mm,高度 50 mm)取作业后土壤样本,根据试验组号对应的耕深进行取样(耕深为 100 mm 时,用取土环刀取深度 0 ~ 50 mm、50 ~ 100 mm 土样,计算土壤容重并取平均值)。取样时,为避免松散土壤从环刀底部漏出,影响试验结果,当取土环刀到达预定深度后,用铁铲将周围土壤清理后,用梯形铲刀沿环刀底部边缘将切入土壤,将环刀底部用铲面密封,防止土壤漏出。将取得的土样放入 105℃干燥箱中干燥至恒质量,将干燥后土样放在电子天平上称量,则耙后土壤容重计算式为

ρ = m_d / V (8)

式中 ρ——土壤容重,g/cm³

m_d——干燥后土样干质量,g

V——环刀容积,cm³

4.4 试验结果与分析

试验设计与试验结果如表 5 所示。表中 X_1、

X_2、X_3 为因素编码值。

表 5 田间试验设计与试验结果
Tab. 5 Design and results of field experiment

试验号	因素			碎土率 Y ₁ /%	耙后地表 平整度	土壤容重 Y ₃ / (g·cm ⁻³)
	X ₁	X ₂	X ₃		Y ₂ /mm	
1	-1	-1	0	91.80	5.6	1.28
2	1	-1	0	97.89	12.9	1.04
3	-1	1	0	89.23	9.3	1.39
4	1	1	0	92.82	15.2	1.16
5	-1	0	-1	90.38	7.8	1.24
6	1	0	-1	96.67	13.2	1.04
7	-1	0	1	94.27	7.5	1.25
8	1	0	1	97.85	13.4	1.10
9	0	-1	-1	94.94	10.3	1.15
10	0	1	-1	92.17	12.6	1.27
11	0	-1	1	96.24	9.8	1.18
12	0	1	1	92.82	11.6	1.31
13	0	0	0	93.52	10.9	1.28
14	0	0	0	95.35	9.7	1.19
15	0	0	0	94.36	12.1	1.21
16	0	0	0	93.21	10.7	1.25
17	0	0	0	94.41	9.2	1.30

4.4.1 试验结果分析与回归模型建立

对表 5 的试验结果进行数据分析,建立动力耙作业效果评价指标(碎土率、耙后地表平整度、土壤容重)与影响因素(转子转速、前进速度、耕深)之间的关系模型,并进行方差分析,结果如表 6 所示。

表 6 动力耙田间试验响应面方差分析结果
Tab. 6 Variance analysis of response surface
of rotary harrow field test

来源	碎土率		耙后地表平整度		土壤容重	
	F	p	F	p	F	p
模型	15.96	0.000 7 **	13.23	0.001 3 **	9.53	0.003 6 **
X ₁	77.52	<0.000 1 **	99.84	<0.000 1 **	53.06	0.000 2 **
X ₂	38.79	0.000 4 **	16.91	0.004 5 **	19.98	0.002 9 **
X ₃	9.99	0.015 9 *	0.923 1	0.368 7	1.34	0.284 5
X ₁ X ₂	2.54	0.155 4	0.011 8	0.916 5	0.671 5	0.439 5
X ₁ X ₃	2.98	0.128	0.047 3	0.834 1	0.342 6	0.576 7
X ₂ X ₃	0.171 4	0.691 3	0.073 8	0.793 7	0.013 7	0.910 1
X ₁ ²	0.401 7	0.546 3	0.057 5	0.817 4	7.43	0.029 5 *
X ₂ ²	6.73	0.035 7 *	1.16	0.317 5	0.405 2	0.544 7
X ₃ ²	5.11	0.058 3	0.005 3	0.944 2	2.33	0.171
失拟	0.699 2	0.599 7	0.315 1	0.815	0.665 1	0.615 9
信噪比	13.859 4		13.003 3		10.836 9	

注: ** 表示极显著(p < 0.01); * 表示显著(0.01 ≤ p < 0.05)。

由表 5 可得动力耙碎土率与试验因素模型为

$$Y_1 = 94.17 + 2.44X_1 - 1.73X_2 + 0.8775X_3 - 0.625X_1X_2 - 0.6775X_1X_3 - 0.1625X_2X_3 - 0.2425X_1^2 - 0.9925X_2^2 + 0.865X_3^2 \quad (9)$$

由表 6 可知,动力耙碎土率与试验因素之间的关系模型极显著($p < 0.01$),表明模型能够很好地解释碎土率。同时,失拟项不显著($p > 0.05$),表明模型拟合程度较好。信噪比为 13.859 4 > 4,这表明模型较优,可以用来进行预测。结果表明,在转子转速、前进速度和耕深等因素的综合作用下,转子转速和前进速度对碎土率影响最为显著,耕深影响次之。

动力耙耙后地表平整度与试验因素模型为

$$Y_2 = 10.56 + 3.25X_1 + 1.34X_2 - 0.3125X_3 + 0.05X_1X_2 - 0.1X_1X_3 - 0.125X_2X_3 + 0.1075X_1^2 + 0.4825X_2^2 + 0.0325X_3^2 \quad (10)$$

由表 6 可知,动力耙耙后地表平整度与试验因素之间的关系模型极显著($p < 0.01$),表明模型能够很好地解释耙后地表平整度。同时,失拟项不显著($p > 0.05$),表明模型拟合程度较好。信噪比为 13.003 3 > 4,这表明模型较优,可以用来进行预测。结果表明,在转子转速、前进速度和耕深等因素的综合作用下,转子转速和前进速度对地表平整度的影响最为显著,耕深影响不显著。

土壤容重与试验因素模型为

$$Y_3 = 1.25 - 0.11X_1 + 0.0675X_2 + 0.0175X_3 + 0.0175X_1X_2 + 0.0125X_1X_3 + 0.0025X_2X_3 - 0.0568X_1^2 + 0.0132X_2^2 - 0.0317X_3^2 \quad (11)$$

由表 6 可知,土壤容重与试验因素之间的关系模型极显著($p < 0.01$),这说明模型能够很好地解释土壤容重。同时,失拟项不显著($p > 0.05$),表明模型拟合程度较好。信噪比为 10.836 9 > 4,这表明模型较优,可以用来进行预测。结果表明,在转子转速、前进速度和耕深等因素的综合作用下,转子转速和前进速度对土壤容重影响最为显著,耕深影响不显著。

由表 6 可知,动力耙转子转速和前进速度对碎土率、耙后地表平整度和土壤容重均有显著影响,而耕深只对碎土率有显著影响,对耙后地表平整度和容重影响不显著。可能原因是:动力耙为立式旋耕作业,作业部件为直立的耙刀,作业时耙刀刃口撞击土壤使其松碎,当耕深较大时,单位时间内耙刀需破碎的土壤量增加,加之随耕深的增大耕层底部土壤坚实度也增加,耙刀碎土效果减弱,产生的大土壤团块增多,影响了碎土率。动力耙碎土作业时,耕层内土壤不会上下混合,底部土壤不会被抛掷到地表面,其作业过程中对表层土壤水平方向的扰动较小,因此耕深对耙后地表的平整度没有较大影响。土壤容重测量为整个耕层内不同深度范围土壤容重平均值,即使随耕深增加耕层底部土壤容重有所增加,但由于是整个耕层内取土壤容重平均值,因此试验得到的数据变化较小,表现为耕深增加对土壤容重的影响较小。

4.4.2 交互因素对作业效果影响

碎土率响应曲面如图 16 所示。由图 16 可知,碎土率随转子转速的增大而升高,随前进速度增加而降低,随耕深增大略有增加。

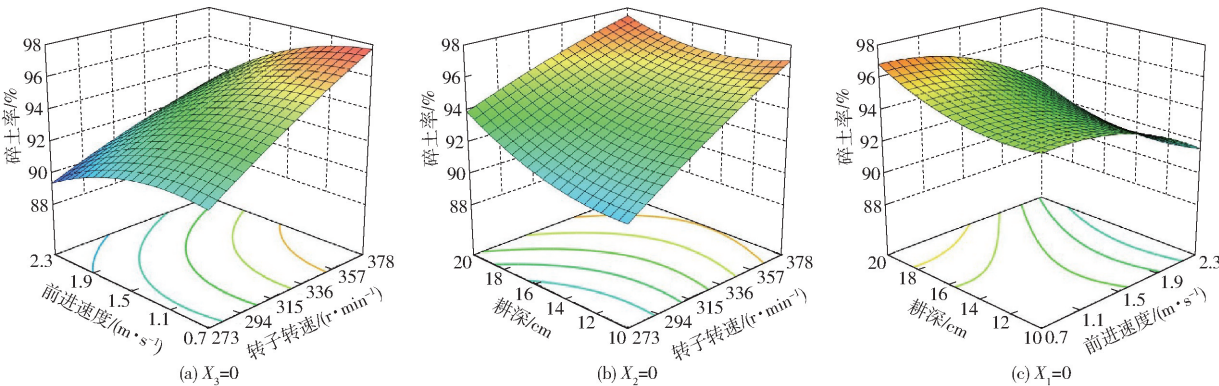


图 16 碎土率与影响因素的响应曲面

Fig. 16 Response surface plots of soil broken rate with respect to influence factors

耙后地表平整度响应曲面如图 17 所示。由图 17 可知,耙后地表平整度随转子转速增大而升高,随前进速度增加而升高,而耕深对耙后地表平整度无显著影响。

土壤容重响应曲面如图 18 所示。由图 18 可

知,土壤容重随转子转速的增加而减小,随前进速度的增加而增大,而耕深的变化对土壤容重无显著影响。

4.4.3 参数优化

为得到动力耙最优作业参数组合,利用 Design-

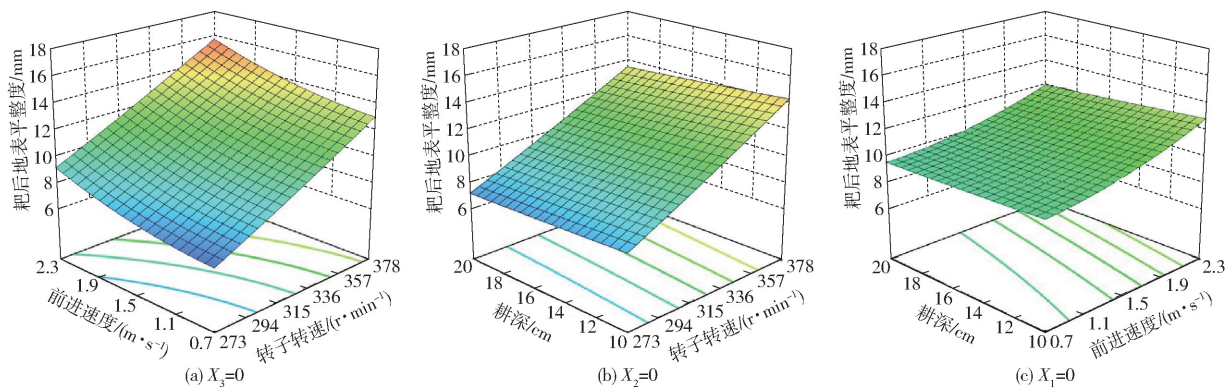


图 17 耙后地表平整度与影响因素的响应曲面

Fig. 17 Response surface plots of soil surface flatness with respect to influence factors

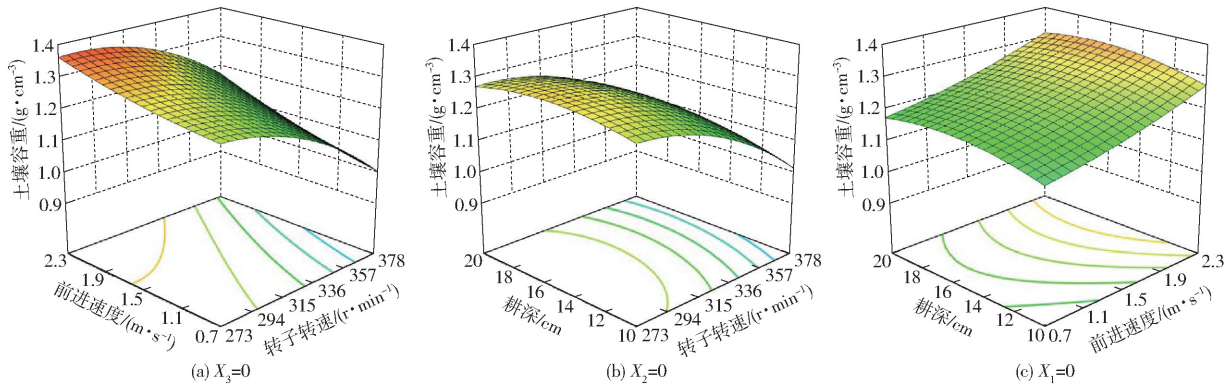


图 18 土壤容重与影响因素的响应曲面

Fig. 18 Response surface plots of density of soil bulk with respect to influence factors

Expert 软件的 Numerical 模块对 3 个回归模型进行优化求解。根据实际作业要求及模型分析结果确定优化约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_3(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

优化求解后,得到最优参数组合:当转子转速为 350 r/min、前进速度为 0.7 m/s、耕深为 20 cm,此时动力耙碎土率为 97.89%,耙后地表平整度为 11.04 mm,土壤容重为 1.11 g/cm³。

4.5 试验验证

对优化得到的最优参数组合进行试验验证,试验用拖拉机动力输出轴有两种转速为 540 r/min 和 720 r/min,根据式(1)~(3)计算,得到最接近最优解的转子转速为:拖拉机动力输出轴转速为 720 r/min 时,转子转速为 365 r/min,与最优结果 350 r/min 相对误差为 4.29%,前进速度选择拖拉机快 1 挡(0.7 m/s),调节耕深至 20 cm。试验结果如表 7 所示。由表可知,转子转速为 365 r/min、前进速度为 0.7 m/s、耕深为 20 cm 时,动力耙碎土率为

表 7 试验验证结果

Tab. 7 Measured results for verification

试验号	碎土率/%	耙后地表平整度/mm	土壤容重/(g·cm ⁻³)
1	96.21	12.6	1.07
2	98.13	11.3	1.13
3	97.52	10.7	1.02
平均值	97.29	11.53	1.07

97.29%,耙后地表平整度为 11.53 mm,土壤容重为 1.07 g/cm³。田间试验得到的动力耙碎土率、耙后地表平整度、土壤容重试验值与优化得到的预测值的相对误差分别为 0.61%、4.44%、3.6%,均小于 5%,试验值与预测值一致。

5 结论

(1)根据桑园种植模式和耕整地作业要求,确定了立式旋转动力耙的主要技术参数,并对其关键部件进行了设计,确定了相邻两转子耙刀安装角为 90°,耙刀回转直径为 210 mm,相邻转子间中心距为 200 mm,耙刀宽度为 95 mm,厚度为 15 mm,高度为 280 mm,切削刃长度为 215 mm。

(2)对动力耙作业过程进行了仿真模拟,分析了不同外倾角对耙刀所受扭矩和作业质量的影响,

得到耙刀外倾角较优范围为 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$; 分析了耙刀作业过程中所受扭矩的变化规律, 确定了动力耙的配套动力为 40 kW。

(3) 通过田间试验, 明确了转子转速、前进速度和耕深对动力耙碎土率、耙后地表平整度和土壤容重的影响。通过参数优化得到动力耙作业参数的最

优组合: 转子转速 350 r/min、前进速度 0.7 m/s、耕深 20 cm, 此时碎土率为 97.89%, 耙后地表平整度为 11.04 mm, 土壤容重为 1.11 g/cm^3 。以优化得到的作业参数组合为试验条件, 进行验证试验, 得到碎土率为 97.29%, 耙后地表平整度为 11.53 mm, 土壤容重为 1.07 g/cm^3 , 与优化得到的结果一致, 满足作业要求。

参 考 文 献

[1] 王勇斌, 宋占华, 高天浩, 等. 我国桑园管理机的应用现状及发展思路[J]. 中国蚕业, 2016, 37(4): 55–59, 64.
WANG Yongbin, SONG Zhanhua, GAO Tianhao, et al. Application status quo and development idea of mulberry management machine in China[J]. China Sericulture, 2016, 37(4): 55–59, 64. (in Chinese)

[2] DU Jun, HENG Yifan, ZHENG Kan, et al. Investigation of the burial and mixing performance of a rotary tiller using discrete element method[J]. Soil & Tillage Research, 2022, 220: 105349.

[3] ZHANG Yifu, LIU Jian, YUAN Wei, et al. Multiple leveling for paddy field preparation with double axis rotary tillage accelerates rice growth and economic benefits[J]. Agriculture, 2021, 11(12): 1223.

[4] HE Dong, LU Caiyun, TONG Zhenwei, et al. Research progress of minimal tillage method and machine in China[J]. AgriEngineering, 2021, 3(3): 633–647.

[5] BALSARI P, BIGLIA A, COMBA L, et al. Performance analysis of a tractor-power harrow system under different working conditions[J]. Biosystems Engineering, 2020, 202: 28–41.

[6] 张闯闯, 曹丽芳, 杨果果. 立式旋耕机的研究现状及发展趋势[J]. 河南农业, 2016(10): 54–55.

[7] 王英博, 荣高, 李洪文, 等. 立式驱动浅旋耙设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 38–47.
WANG Yingbo, RONG Gao, LI Hongwen, et al. Design and parameter optimization of vertical driving-type surface rotary tillage machine[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 38–47. (in Chinese)

[8] ZHAI Shike, SHI Yixin, ZHOU Junchi, et al. Simulation optimization and experimental study of the working performance of a vertical rotary tiller based on the discrete element method[J]. Actuators, 2022, 11(12): 342.

[9] CHEN Wei, DING Yan, TASHI N, et al. Design and experiment of a vertical rotary tillage machine with fixed-layer fertilization function[J]. INMATEH Agricultural Engineering, 2022, 67(2): 33–40.

[10] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.

[11] ZHAI Lichao, XU Ping, ZHANG Zhengbin, et al. Effects of deep vertical rotary tillage on dry matter accumulation and grain yield of summer maize in the Huang–Huai–Hai Plain of China science direct[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 170: 167–174.

[12] MATIN M A, HOSSAIN M I, GATHALA M K, et al. Optimal design and setting of rotary strip-tiller blades to intensify dry season cropping in Asian wet clay soil conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 207: 104854.

[13] VARANI M, MATTETTI M, MOLARI G, et al. Correlation between power harrow energy demand and tilled soil aggregate dimensions[J]. Biosystems Engineering, 2023, 225: 54–68.

[14] UCGUL M, SAUNDERS C, LI Peilin, et al. Analyzing the mixing performance of a rotary spader using digital image processing and discrete element modelling (DEM)[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2018, 151: 1–10.

[15] SUN Jiyu, WANG Yueming, MA Yunhai, et al. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth > 40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics[J]. Advances in Engineering Software, 2018, 119(5): 30–37.

[16] BARR J B, UCGUL M, DESBIOLLES J M A, et al. Simulating the effect of rake angle on narrow opener performance with the discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2018, 171: 1–15.

[17] 方会敏, 姬长英, 张庆怡, 等. 基于离散元法的旋耕刀受力分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(21): 54–59.
FANG Huimin, JI Changying, ZHANG Qingyi, et al. Force analysis of rotary blade based on distinct element method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(21): 54–59. (in Chinese)

[18] 丁启朔, 任骏, BELAL E A, 等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 38–48.
DING Qishuo, REN Jun, BELAL E A, et al. 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)

[19] 刘莫尘, 赵庆吉, 韩守强, 等. 桑园自走式变比配肥定向撒肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 2): 120–130, 140.
LIU Mochen, ZHAO Qingji, HAN Shouqiang, et al. Development and test of self-walking mulberry garden integrated machine with variable proportion and directional disperse fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2): 120–130, 140. (in Chinese)

[20] 朱惠斌, 吴宪, 白丽珍, 等. 基于 EDEM–ADAMS 仿真的稻茬地双轴破茬免耕装置研制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19): 10–22.
ZHU Huibin, WU Xian, BAI Lizhen, et al. Development of the biaxial stubble breaking no-tillage device for rice stubble field

- based on EDEM – ADAMS simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(19): 10 – 22. (in Chinese)
- [21] 秦宽, 丁为民, 方志超, 等. 犁翻旋耕复式作业耕整机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 7 – 16.
QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 7 – 16. (in Chinese)
- [22] 王宪良, 胡红, 王庆杰, 等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 78 – 85.
WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 78 – 85. (in Chinese)
- [23] 向伟, 吴明亮, 吕江南, 等. 基于堆积试验的黏壤土仿真物理参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 116 – 123.
XIANG Wei, WU Mingliang, LÜ Jiangnan, et al. Calibration of simulation physical parameters of clay loam based on soil accumulation test[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(12): 116 – 123. (in Chinese)
- [24] 李俊伟, 佟金, 胡斌, 等. 不同含水率黏重黑土与触土部件互作的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 130 – 140.
LI Junwei, TONG Jin, HU Bin, et al. Calibration of parameters of interaction between clayey black soil with different moisture content and soil-engaging component in northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6): 130 – 140. (in Chinese)
- [25] UCGUL M, SAUNDERS C, FIELKE J M. Discrete element modelling of top soil burial using a full scale mouldboard plough under field conditions[J]. Biosystems Engineering, 2017, 160: 140 – 153.
- [26] ASAF Z, RUBINSTEIN D, SHMULEVICH I. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 92(1 – 2): 227 – 242.
- [27] 宋占华, 李浩, 闫银发, 等. 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 Zhanhua, LI Hao, YAN Yinfa, et al. 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)
- [28] 杨硕. 桑园动力耙的优化设计与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
YANG Shuo. Optimal design and experimental on rotary harrow in mulberry field[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [29] 张锐, 韩佃雷, 吉巧丽, 等. 离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 49 – 56.
ZHANG Rui, HAN Dianlei, JI Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 49 – 56. (in Chinese)
- [30] 戴飞, 宋学锋, 赵武云, 等. 全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 49 – 56, 77.
DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 49 – 56, 77. (in Chinese)
- [31] 高振, 卢彩云, 位旭阳, 等. 协拨组合式玉米条带秸秆清理装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 68 – 79.
GAO Zhen, LU Caiyun, WEI Xuyang, et al. Design and experiment of co-stirring combined corn strip straw cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 68 – 79. (in Chinese)
- [32] 张仕林, 黄玉祥, 赵宏波, 等. 切抛组合式小麦宽幅沟播茬清秸防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 40 – 52.
ZHANG Shilin, HUANG Yuxiang, ZHAO Hongbo, et al. Design and experiment of cutting and throwing combined anti-blocking device for wide-seedbed seeding of wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 40 – 52. (in Chinese)
- [33] 王法安, 倪畅, 张兆国, 等. 三七收获机挖掘铲减阻特性分析与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 179 – 190, 199.
WANG Faan, NI Chang, ZHANG Zhaoguo, et al. Analysis and experiment on drag reduction characteristics of digging shovel of *Panax notoginseng* harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 179 – 190, 199. (in Chinese)
- [34] 张永良. 基于离散元的逆转旋耕施肥播种机抛土性能仿真及试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
ZHANG Yongliang. Simulation and experimental study throwing soil performance of reversal cultivated land and fertilization seeder based on DEM[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012. (in Chinese)
- [35] USABORISUT P, SUKCHAROENVIPHARAT W, CHOEDKIATPHON S. Tilling tests of rotary tiller and power harrow after subsoiling[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2020, 19(6): 391 – 400.