

反向旋抛式油莎豆起挖装置设计与试验

何晓宁^{1,2} 张学军¹ 赵 壮² 尚书旗² 王东伟² 杨 帅²

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109)

摘要: 针对油莎豆挖掘装置以正向旋转挖掘方式为主,其漏豆率高、易拥堵、根系环抱体土壤难破碎,导致后续清选分离困难,联合收获工作效率极低等问题,应用离散元仿真分析方法,建立油莎豆根系-块茎-土壤离散元模型,分析油莎豆根系-块茎-土壤之间相互作用对油莎豆根系土壤环抱体碎裂的影响机理,设计一种反向旋抛式油莎豆起挖装置,并应用单因素和正交旋转中心组合试验方法,研究反旋挖掘装置旋耕刀相位角和安装间距对性能指标埋果率和土壤破碎率影响规律和优化参数组合,试验结果表明,反向旋抛式油莎豆起挖装置的最佳组合参数为:相位角 61°、安装间距 150 mm,此时土壤破碎率为 94.10%、埋果率为 1.39%,在相同参数设置下与普通旋耕刀组合进行田间验证试验,结果表明,埋果率降低了 13.33%,土壤破碎率提高了 3.15%,满足油莎豆机械化收获部颁标准技术要求。研究结果为进一步提升油莎豆收获机具研发提供了理论依据。

关键词: 油莎豆; 离散元仿真; 起挖装置; 设计

中图分类号: S222.7⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)05-0034-10

OSID:



Design and Optimization Tests of Reverse Spin-throwing *Cyperus edulis* Starting Device

HE Xiaoning^{1,2} ZHANG Xuejun¹ ZHAO Zhuang² SHANG Shuqi² WANG Dongwei² YANG Shuai²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: Aiming at the problems of high leakage rate, easy congestion and difficult soil fragmentation in the root system, which lead to difficulties in subsequent sorting and separation and low efficiency of combined harvesting. The discrete element simulation method was applied to establish the root - tuber - soil discrete element model of *Cyperus edulis*, the mechanism of the interaction between root - tuber - soil of *Cyperus edulis* on the fragmentation of the root-soil annulus of *Cyperus edulis* was analyzed, and a reverse spin-throw type starting device was designed. The results showed that the optimum combination of parameters for the reverse rotary tiller was as follows: phase angle of 61°, installation spacing of 150 mm, soil fragmentation rate of 94.10%, buried fruit rate of 1.39%, under the same parameter settings with ordinary rotary tiller combination for field verification test, the results showed that buried fruit rate was reduced by 13.33%, soil fragmentation rate was increased by 3.15%, which met the technical requirements of Chinese *Cyperus edulis* mechanized harvesting standards, the research results can provide a theoretical reference basis for further improvement of *Cyperus edulis* harvesting equipment development.

Key words: *Cyperus edulis*; discrete element simulation; starting device; design

0 引言

油莎豆是原产于非洲及地中海沿岸国家的一种

草本植物^[1-2],是集油、粮、牧、饲、绿化观赏于一体的新型经济作物^[3-4]。降低油莎豆收获过程中能量消耗是解决油莎豆机械化收获的关键问题,由于油

收稿日期: 2022-04-02 修回日期: 2022-04-28

基金项目: 新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJ2021G164)、新疆维吾尔自治区科技支疆计划项目(2020E02112)和河南省重大科技专项(211100110100)

作者简介: 何晓宁(1988—),男,博士生,青岛农业大学讲师,主要从事根茎类作物机械化领域研究,E-mail:944286200@qq.com

通信作者: 张学军(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事耕层残膜回收及林果机械化研究,E-mail:zhxjau@sina.com

莎豆种植土壤的差异性、环抱体在收获过程中的运动以及碎裂等因素,阻碍了其机械化的进步^[5-6],亟需对收获机理进行探究。

近年来,国内外专家学者对于作物-土壤-机具相互作用机理进行了研究,RAHMAN 等^[7]利用土槽试验研究了 4 种机具耕作时土壤运动和扰动情况,LIU 等^[8]通过不同情况下残茬-土壤-机具的相互作用分析,对土壤破碎机理进行了研究,方会敏等^[9]为进一步研究秸秆-土壤-旋耕刀的宏观及微观相互作用机理,利用土槽试验和 EDEM 仿真验证,分析了秸秆和土壤运动规律,丁为民等^[10]进行了正、反转旋耕的对比试验,认为反转旋耕可获得良好的耕作土层,何晓宁等^[11]针对油莎豆旋耕挖掘方式进行反旋运动学分析,建立了旋耕刀与油莎豆团聚体离散元模型,设计了一种反旋刀片,结合标准旋耕刀对比试验,证明反旋挖掘具有降阻作用。

本文利用离散元方法,构建旋耕刀-土壤-油莎豆根系土壤环抱体的离散元模型,研究不同土层下油莎豆根系土壤环抱体的运动规律与破碎机理,设计一种反向旋抛式油莎豆起挖装置,并对不同结构参数的起挖装置进行试验,以期油莎豆挖掘装置的研发提供理论参考。

1 结构与工作原理

以牵引式反转旋耕装置为分析对象,研究其反转旋耕刀在油莎豆收获过程中的作业性能,装置结构示意图如图 1 所示。反旋式油莎豆挖掘装置主要由左侧挡板、刀轴、刀座、刀片、变速箱、悬挂架、安装机架、右侧挡板组成。田间作业时,由拖拉机输出轴将动力传递给反转旋耕装置,带动旋耕刀轴旋转切削土壤,并将豆土混合物沿导流护罩向后抛送,完成油莎豆收获挖掘作业。

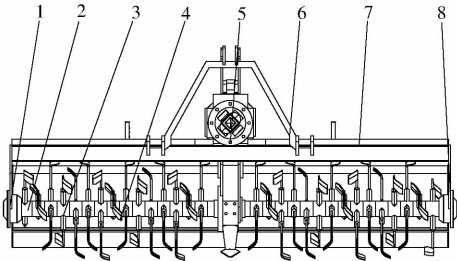


图 1 反转旋耕装置结构示意图

Fig.1 Structure diagram of anti-rotation planting device

1. 左侧挡板 2. 刀轴 3. 刀座 4. 刀片 5. 变速箱 6. 悬挂架
7. 安装机架 8. 右侧挡板

旋耕刀为反转旋耕装置中的主要工作部件,由侧切面、过渡面、正切面组成,如图 2 所示。侧切面具有切开土堡,切断或推开草茎及残茬的功能;正切

面具有切削土壤及翻土、碎土、抛土等功能,本文结合离散元仿真试验,探究侧切面、过渡面、正切面对油莎豆收获的影响规律。

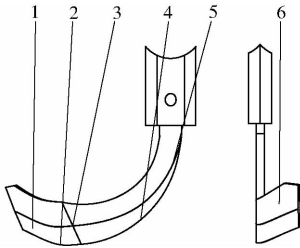


图 2 旋耕刀结构简图

Fig.2 Structure diagram of rotary blade

1. 正切刃 2. 过渡刃 3. 过渡面 4. 侧切刃 5. 侧切面 6. 正切面

以河南地区油莎豆种植模式为主要研究对象,通过实地调研分析,河南地区油莎豆种植区域以沙质土壤为主,油莎豆种植模式为平作,种植株距为 13 ~ 15 cm,行距为 15 ~ 20 cm,根系深度为 13 ~ 15 cm,如图 3 所示,土壤物理特性如表 1 所示。

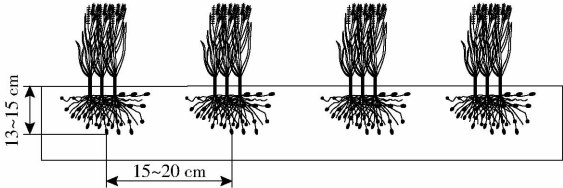


图 3 油莎豆种植模式

Fig.3 Cultivation mode of *Cyperus edulis*

表 1 土壤参数测定结果

Tab.1 Measurement results of soil parameters

土壤深度/ mm	土壤含水率/ %	土壤密度/ (g·cm ⁻³)	土壤坚实度/ kPa
0 ~ 50	18. 12	1. 35	564
50 ~ 100	20. 56	1. 42	653
100 ~ 150	21. 15	1. 77	817
平均值	19. 94	1. 51	678

2 油莎豆根系土壤环抱体仿真模型

2.1 接触模型

土壤颗粒之间接触模型选择 Hertz-Mindlin with Bonding 模型^[12],如图 4 所示,该模型可以通过结合力将相邻两个土壤颗粒粘结在一起,结合力可以承受切向和法向位移,可以表示旋耕刀铲与油莎豆根系土壤环抱体存在的复杂受力关系,可以模拟土壤颗粒之间的粘结作用和土壤颗粒破碎,通过粘结键破碎数量得出土壤破碎率。选择土壤颗粒半径 5 mm,颗粒粘结半径为 5.5 mm,其中该模型单位面积法向刚度为 $1.2 \times 10^5 \text{ N/m}^3$,单位面积切向刚度为 $1.5 \times 10^5 \text{ N/m}^3$,临界法向应力为 $1.1 \times 10^5 \text{ Pa}$,临

界切向应力为 $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

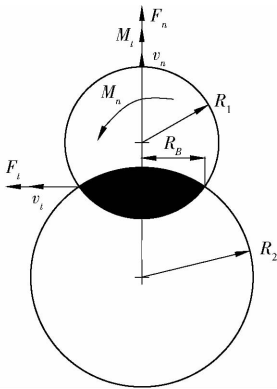


图 4 粘结键受力图

Fig. 4 Force analysis diagram of bonded bond

土壤颗粒间 Hertz-Mindlin with Bonding 接触模型计算公式为

$$\begin{cases} \delta F_n = -v_n k_n A \delta_t \\ \delta F_t = -v_t k_t A \delta_t \\ \delta M_n = -\omega_n k_n A \delta_t \\ \delta M_t = -\omega_t k_t \frac{J}{2} \delta_t \\ A = \pi R_B^2 \\ J = \frac{1}{2} \pi R_B^4 \end{cases} \quad (1)$$

式中 F_n ——法向接触力, N
 F_t ——切向接触力, N
 M_n ——法向力矩, N·m
 M_t ——切向力矩, N·m
 v_n ——法向速度, m/s
 v_t ——切向速度, m/s
 k_n ——法向刚度, N/m
 k_t ——切向刚度, N/m
 ω_n ——法向角速度, rad/s
 ω_t ——切向角速度, rad/s
 A ——单位接触面积, mm²
 J ——惯性矩, mm⁴
 δ_t ——时间步长, s
 R_B ——颗粒粘结半径, mm

土壤颗粒间在法向和切向应力达到一定极值时粘结键将会断裂, 设断裂时法向应力和切向应力分别为 $\sigma_{\max}$ 、 $\tau_{\max}$, 当粘结键断裂时有

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

2.2 离散元接触参数

为了确保仿真试验的准确性, 通过参数试验以

及查阅文献[13–16], 确定仿真试验所涉及的接触参数和基本物理参数, 如表 2 所示。

表 2 离散元参数
Tab. 2 Discrete element parameter

参数	数值
旋耕刀泊松比	0.35
旋耕刀剪切模量/Pa	7.8×10^{10}
旋耕刀密度/(kg·m ⁻³)	7 850
土壤-土壤恢复系数	0.25
土壤-土壤动摩擦因数	0.45
土壤-土壤静摩擦因数	0.30
土壤-旋耕刀恢复系数	0.40
土壤-旋耕刀动摩擦因数	0.45
土壤-旋耕刀静摩擦因数	0.03
土壤-块茎恢复系数	0.60
土壤-块茎动摩擦因数	0.45
土壤-块茎静摩擦因数	0.15

2.3 离散元建模

利用 EDEM 2020 软件进行旋耕刀作用下的油莎豆根系土壤环抱体碎裂与运动的离散元仿真, 将 SolidWorks 建立的旋耕刀模型保存为 STL 格式导入 EDEM 中, 在离散元仿真试验中, 多数研究者采用直径大于 10 mm 的土壤颗粒模型作为研究对象^[17–19], 为进一步提高仿真试验精度, 本文采用土壤颗粒直径为 5 mm, 利用 SolidWorks 将油莎豆块茎三维模型导入 EDEM 中, 利用颗粒快速填充完成离散元建模。由于油莎豆根系具有柔软、细长、地下茎分须多且方向不一致等特点, 且垂直分布于土壤中^[20], 很难精准仿真油莎豆根须, 本文将油莎豆根上部分采用直径为 8 mm、球心间隔为 4 mm 的颗粒进行组成, 采用直径为 3 mm、球心间隔为 1.5 mm 的 219 个颗粒组成 15 cm 长油莎豆根系, 颗粒模型如图 5 所示。

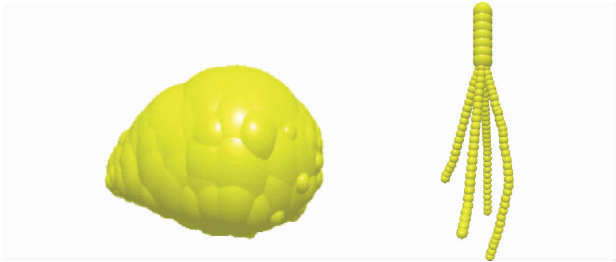


图 5 油莎豆块茎和根茎离散元模型

Fig. 5 Discrete element model of tubers and rhizomes of *Cyperus edulis*

2.4 离散元试验设计

为模拟油莎豆挖掘装置实际作业状态, 根据河南地区油莎豆种植模式, 利用 EDEM 建立长 120 cm, 高 40 cm 虚拟土槽, 以土槽长方体作为土壤颗粒的颗粒工厂生成土壤颗粒, 土壤颗粒数量为 150 000,

油莎豆株距 15 cm,行距 16 cm,每株油莎豆土壤环抱体结合 12 个油莎豆块茎;同时根据前文土壤性质进行分层处理,0 ~ 5 cm 为浅层,5 ~ 10 cm 为中层,10 ~ 15 cm 为深层,为便于分析在仿真过程中各层土壤-油莎豆-块茎运动规律,在油莎豆-土壤-机具仿真模型中相应的进行土层划分,如图 6 所示。

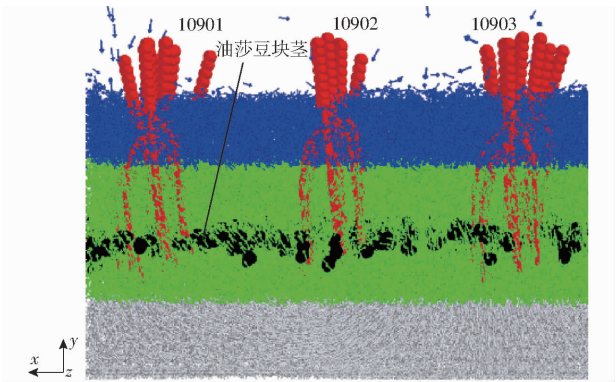


图 6 土壤-旋耕刀-油莎豆土壤环抱体模型
Fig. 6 Soil - rotary cutter - *Cyperus edulis* agglomerate model

在仿真试验过程中,旋耕刀弯折角为 110°,旋耕刀工作幅宽为 30 mm,同时将旋耕刀前进速度设置为 0.5 m/s,刀轴角速度为 30 rad/s,工作耕深为 15 cm,为保证仿真过程精确性和连续性,设置仿真步长为 3.14×10^{-6} ,网格单元尺寸为 9 mm,为最小颗粒半径的 3 倍,颗粒粘结半径为 5.5 mm,颗粒生成时间为 0.4 s,仿真时间为 4 s^[21-24]。

2.5 油莎豆土壤环抱体运动分析

2.5.1 油莎豆根系微观运动

在离散元仿真过程中可以分析每个时刻耕作过程中油莎豆根系的运动轨迹,选取相邻 3 行油莎豆根系进行研究,分别命名为 10901、10902、10903,如图 7 所示,研究旋耕刀反旋状态下油莎豆根系的运动规律,10901 油莎豆根系位于旋耕刀工作范围边缘区域,10902 油莎豆根系位于旋耕刀正切刃内侧靠近过渡刃的区域,10903 油莎豆根系位于旋耕刀正切刃上方。在旋耕刀工作过程中每行油莎豆根系运动规律较为复杂,采用每行油莎豆在旋耕刀作用下的位移和受力来表征油莎豆运动特性,如图 8 所示。

油莎豆根系的位移和受力情况如图 9、10 所示。由图 9 可知,旋耕刀开始切削土壤时,在 0 ~ 0.2 s 时间内,10901、10902、10903 几乎同时开始运动,但由于 10901 号位于旋耕刀工作范围边缘区域,位移最小,10902 油莎豆根系位于旋耕刀侧切刃内侧靠近过渡刃的区域,受到土壤扰动影响较小,位移次之,位于正切刃正上方的 10903 号在正切刃动态滑切作用下使得油莎豆根系向上运动的幅度最大,在 0.2 s

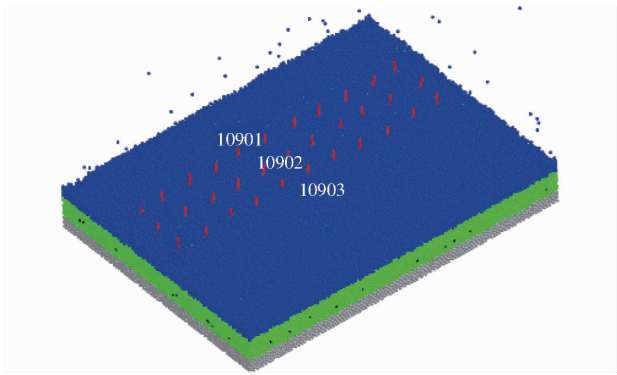


图 7 油莎豆土壤环抱体模型
Fig. 7 Aggregate model of *Cyperus edulis*

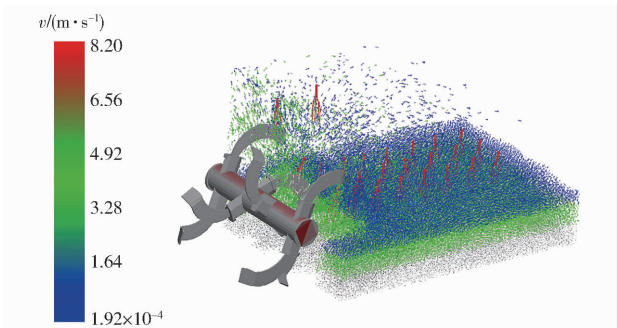


图 8 仿真挖掘试验矢量图
Fig. 8 Simulation excavation test vector illustration

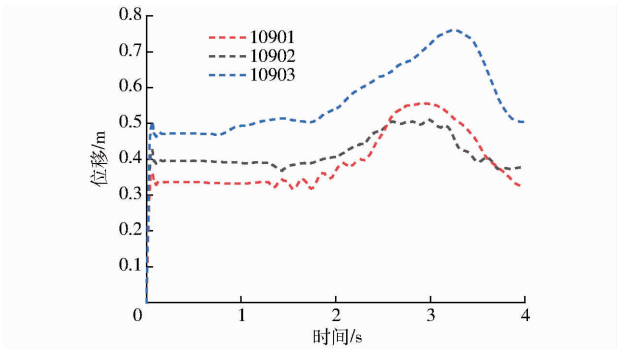


图 9 油莎豆根系位移曲线
Fig. 9 Root displacement curves of *Cyperus edulis*

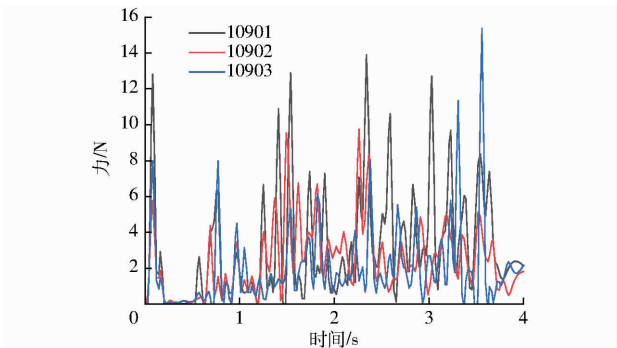


图 10 油莎豆根系受力曲线
Fig. 10 Root force curves of *Cyperus edulis*

之后,油莎豆根系的位移有减小的趋势,主要是因为油莎豆在抛送过程中受抛起土壤的阻力作用。

由图 10 可知,在旋耕刀刚接触油莎豆根系时,

油莎豆根系受力瞬间增大,但由于 3 行油莎豆 10901、10902、10903 位于旋耕刀工作区域不同,其受力也不同,但随着旋耕刀的往复式切削土壤,3 组油莎豆根系受力的变化趋势一致。

2.5.2 油莎豆块茎微观运动

通过油莎豆种植基地实地调研与数据采集,油莎豆根系与油莎豆块茎的结合力在 1~2N 之间,在旋耕刀切削力的作用下部分油莎豆块茎与根系分离,为便于研究油莎豆在仿真过程中运动轨迹,以 10901、10902、10903 所分布的油莎豆块茎为研究对象,利用油莎豆土壤环抱体矢量运动来分析油莎豆块茎位移和受力规律。

油莎豆块茎位移和受力情况如图 11、12 所示。由于所选取的研究对象位于旋耕刀有效工作区域不同,导致在仿真过程中油莎豆块茎受到土壤扰动影响也有所不同,0~0.2 s 过程中,由于受到旋耕刀切削作用部分油莎豆块茎与根系分离,油莎豆块茎位移和受力瞬时增大,块茎随着旋耕刀运动轨迹向上抛起,由于在抛起的过程中受到土壤的阻力作用,油莎豆块茎位移略微降低,但随着仿真进行,油莎豆块茎位移和受力与油莎豆根系变化趋势一致。

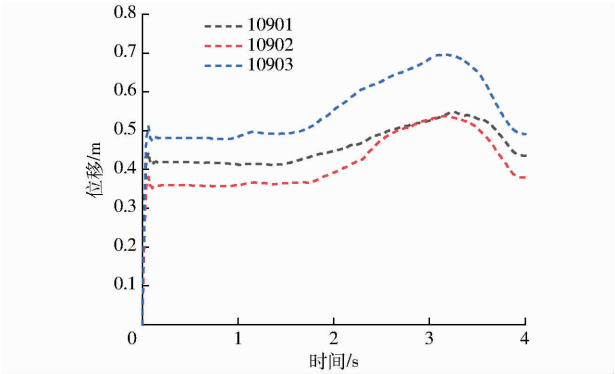


图 11 油莎豆块茎位移曲线

Fig. 11 Displacement curves of tuber of *Cyperus edulis*

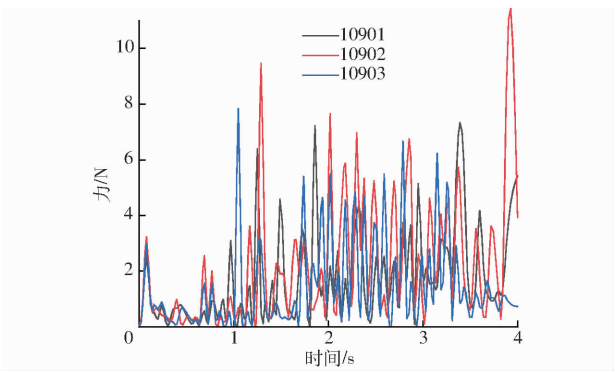


图 12 油莎豆块茎受力曲线

Fig. 12 Force curves of tuber of *Cyperus edulis*

2.5.3 土壤颗粒微观运动

旋耕刀在反旋工作过程中正切刀部位首先开始切削土壤,由下至上切削,依次接触深层土壤、中层

土壤和浅层土壤,各层土壤前进方向的位移主要由旋耕刀切削以及周围土壤扰动造成,在旋耕刀切土的过程中,首先接触深层土壤,由于受到浅层和中层土壤的阻碍作用,故深层土壤位移最小,中层土壤次之,浅层土壤位移最大,其各层土壤位移和受力曲线如图 13、14 所示。

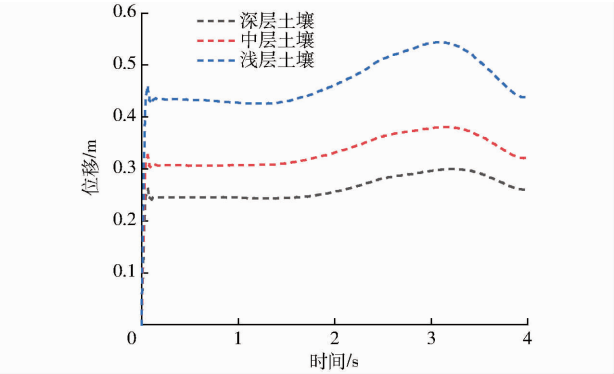


图 13 土壤位移曲线

Fig. 13 Soil displacement curves

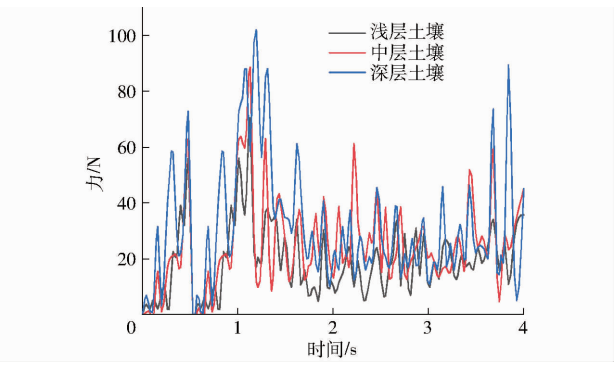


图 14 土壤受力曲线

Fig. 14 Soil force curves

3 参数优化试验

3.1 试验材料

试验设备包括:TCC 电力变频四轮驱动土槽试验车、油莎豆反向旋抛装置试验台架、BZ1403 型拉力传感器、BSQ-2 型变送器、PXI-6133 型数据采集卡、便携式计算机、电子秤、米尺等。2021 年 11 月于青岛农业大学机电工程学院土槽实验室进行,如图 15 所示。

3.2 单因素试验

3.2.1 试验设计

为探究影响油莎豆土壤环抱体破碎效率的主要因素影响因素取值范围,在旋耕刀结构参数分析的基础上,以相位角 β 以及安装间距 S 为试验因素,以埋果率和土壤破碎率为试验指标进行单因素试验,同时充分考虑旋耕刀弯折角、工作幅宽以及回转半径对于试验指标的影响关系,根据河南民权油莎豆种植农艺要求,选取相位角取值范围为 $10^{\circ} \sim 90^{\circ}$,安装



图 15 油莎豆挖掘台架试验

Fig. 15 *Cyperus edulis* excavation bench test

间距取值范围为 100 ~ 220 mm。

3.2.2 试验结果与分析

设定旋耕刀前进速度为 0.5 m/s、刀轴角速度 30 rad/s,旋耕刀安装间距 S 为 100 mm、相位角 β 分别为 $10^\circ \sim 90^\circ$ 进行试验。旋耕刀相位角 β 对土壤环抱体破碎率的影响如图 16 所示,随着相位角的增大,油莎豆根茎土壤破碎率呈先增大后减小的趋势,在相位角为 50° 时接近峰值。旋耕刀相位角 β 对埋果率的影响如图 17 所示,随着 β 的增大,埋果率呈先减小后增大的趋势,在 β 为 $40^\circ \sim 70^\circ$ 时,埋果率较小。

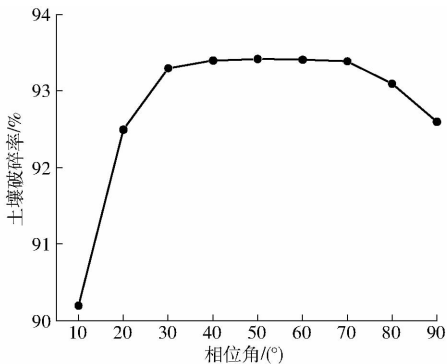


图 16 相位角对土壤破碎率的影响

Fig. 16 Influence of phase angle on soil fragmentation rate

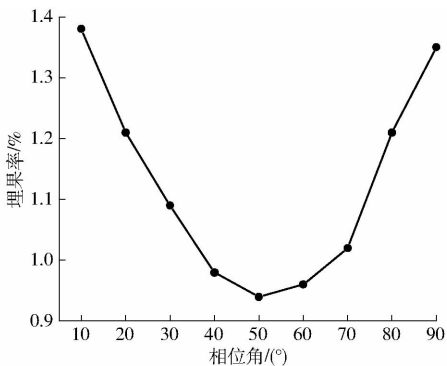


图 17 相位角对埋果率的影响

Fig. 17 Influence of phase angle on work resistance

设定旋耕刀前进速度为 0.5 m/s、刀轴角速度为 30 rad/s、旋耕刀相位角 β 为 40° 、安装间距 S 分别为

100 ~ 220 mm 进行台架试验。旋耕刀安装间距 S 对土壤环抱体破碎率的影响如图 18 所示,随着 S 的增大,在间距为 160 mm 时接近峰值,但间距在 130 ~ 160 mm 之间,破碎率变化不大。旋耕刀安装间距 S 对埋果率的影响如图 19 所示,随着 S 的增大,埋果率呈先减小后增大的趋势,在 S 为 140 ~ 170 mm 时,埋果率较小。

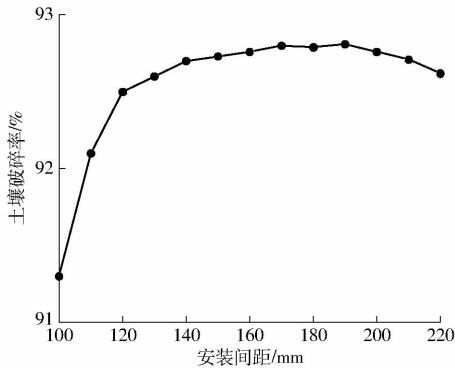


图 18 安装间距对土壤破碎率的影响

Fig. 18 Influence of installation spacing on soil fragmentation rate

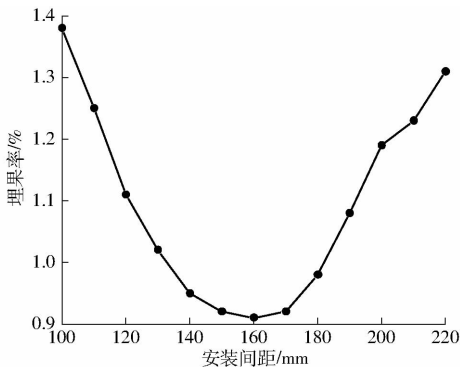


图 19 安装间距对埋果率的影响

Fig. 19 Influence of installation spacing on working resistance

综上所述,选取旋耕刀相位角 β ($40^\circ \sim 70^\circ$) 和旋耕刀间距 S (140 ~ 170 mm),挖掘装置可以获得比较理想的作业性能。

3.3 多因素试验

3.3.1 试验设计

为进一步探究油莎豆土壤环抱体的破碎规律以及破碎效果,设计二因素五水平二次正交旋转中心组合试验方案,以旋耕刀相位角、旋耕刀安装间距为试验因素,以埋果率和土壤破碎率为试验指标,结合前期油莎豆土壤环抱体运动分析以及单因素试验结果,试验因素编码表如表 3 所示。

3.3.2 试验结果与分析

试验结果如表 4 所示, x_1 、 x_2 为相位角、安装间距编码值。对表 4 数据进行二元回归拟合,得到以编码值表示的埋果率和土壤破碎率回归方程为

表 3 试验因素编码
Tab.3 Test factors and coding

编码	因素	
	相位角 $\beta/(^{\circ})$	安装间距 S/mm
-1.414	40	140
-1	45	145
0	55	155
1	65	165
1.414	70	170

表 4 仿真试验结果
Tab.4 Simulation test results

序号	因素		埋果率/ %	土壤破碎率/ %
	相位角 x_1	安装间距 x_2		
1	-1	-1	1.79	92.24
2	1	-1	2.15	94.75
3	-1	1	2.21	93.68
4	1	1	2.13	92.42
5	-1.414	0	1.65	93.73
6	1.414	0	1.86	94.65
7	0	-1.414	1.48	93.21
8	0	1.414	2.35	92.76
9	0	0	1.51	93.25
10	0	0	1.15	94.12
11	0	0	1.14	93.65
12	0	0	1.13	93.32
13	0	0	1.11	93.78
14	0	0	1.12	93.42
15	0	0	1.26	93.23
16	0	0	1.19	93.65

$$y_1 = 1.20 + 0.072x_1 + 0.20x_2 - 0.11x_1x_2 + 0.34x_1^2 + 0.42x_2^2 \tag{3}$$

$$y_2 = 93.55 + 0.32x_1 - 0.19x_2 - 0.94x_1x_2 + 0.24x_1^2 - 0.36x_2^2 \tag{4}$$

试验指标埋果率和土壤破碎率的方差分析结果如表 5、6 所示。

表 5 埋果率方差分析
Tab.5 Analysis of variance of buried fruit rate

来源	平方和	自由度	均方和	F	P
模型	2.71	5	0.54	16.81	0.000 1 **
x_1	0.042	1	0.042	1.29	0.282 1
x_2	0.33	1	0.33	10.32	0.009 3 *
x_1x_2	0.048	1	0.048	1.50	0.248 3
x_1^2	0.90	1	0.90	27.49	0.000 4 **
x_2^2	1.38	1	1.38	42.92	<0.000 1 **
失拟	0.20	3	0.066	3.66	0.071 4
误差	0.13	7	0.018		
总和	3.03	15			

注：**表示差异极显著 ($P < 0.01$), * 表示差异显著 ($P < 0.05$),下同。

表 6 土壤破碎率方差分析
Tab.6 Analysis of variance of soil fragmentation rate

来源	平方和	自由度	均方和	F	P
模型	6.17	5	1.23	14.24	0.000 3 **
x_1	0.81	1	0.81	9.39	0.012 0 **
x_2	0.29	1	0.29	3.36	0.096 7
x_1x_2	3.55	1	3.55	40.99	< 0.000 1 **
x_1^2	0.46	1	0.46	5.32	0.043 8 *
x_2^2	1.05	1	1.05	12.13	0.005 9 **
失拟	0.21	3	0.069	0.73	0.565 4
误差	0.66	7	0.094		
总和	7.04	15			

由表 5 可知,安装间距 x_2 对埋果率的影响显著, x_1^2 、 x_2^2 对埋果率影响极其显著。安装间距和相位角对埋果率影响的响应面如图 20 所示。结合式 (3) 和响应曲面的等高线分布密度,安装间距 S 和相位角 β 对于油莎豆埋果率存在交互作用。当安装间距 S 一定时,随着相位角的增加,油莎豆埋果率呈先增加后减少;当相位角 β 一定时,随着安装间距 S 的增加,油莎豆埋果率同样呈先增加后减少趋势。

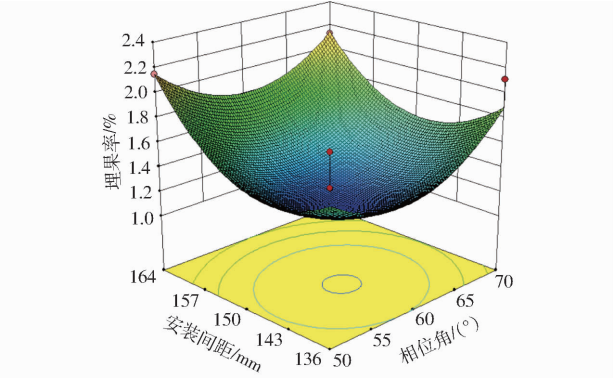


图 20 试验因素对埋果率的影响
Fig.20 Influence of test factors on work resistance

由表 6 可知, x_1 、 x_1x_2 、 x_2^2 对土壤破碎率的影响极其显著, x_1^2 对土壤破碎率影响显著。相位角 x_1 、安装间距 x_2 对土壤破碎率影响的响应面如图 21 所示。结合式 (4) 和响应曲面的等高线分布密度,安装间距 S 和相位角 β 对于土壤破碎率存在交互作用。当安装间距 S 一定时,随着相位角的增加,土壤破碎率逐渐增大;当相位角 β 一定时,随着安装间距 S 的增加,土壤破碎率呈先增加后减少趋势。

3.3.3 参数优化

为得到相位角和安装间距最佳试验因素参数组合,设立优化目标与边界条件为

$$\begin{cases} \min y_1 \\ \max y_2 \\ \text{s. t. } \begin{cases} 40^{\circ} \leq \beta \leq 70^{\circ} \\ 140 \text{ mm} \leq S \leq 170 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \tag{5}$$

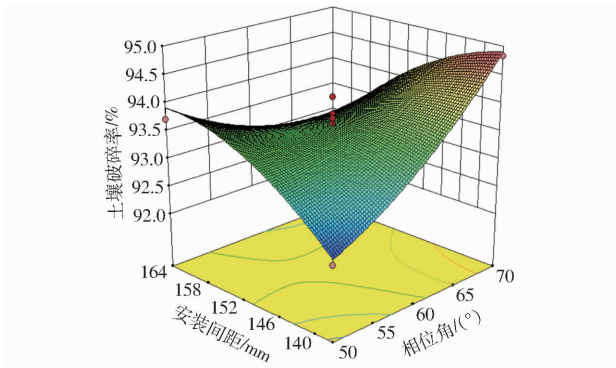


图 21 试验因素对土壤破碎率的影响

Fig. 21 Influence of test factors on soil fragmentation rate

利用 Design-Expert 分析求解,当相位角 61°、安装间距 150 mm 时,为最优参数组合,此时埋果率为 1.39%,土壤破碎率为 94.10%。

3.4 田间验证试验

3.4.1 试验设计

为验证最优参数组合下油莎豆收获质量,于 2021 年 12 月在河南省民权油莎豆种植基地进行田间收获试验,该地区油莎豆种植模式为平作,如图 22 所示。结合农艺要求、理论分析与仿真模拟参数优化试验结果,可得行距为 140 mm,株距为 120 mm,油莎豆生长深度 160 mm,土壤含水率为 16.5%,田间试验土壤类型为沙土。



图 22 油莎豆田间试验

Fig. 22 Field test of *Cyperus edulis*

油莎豆埋果率测定,参照 NY/T 502—2016《收获机作业质量》,土壤破碎率测定,按照 GB/T 5668—2008《土壤破碎率测量》实施。试验重复进行 6 次,每行随机测量 10 点,埋果率和土壤破碎率计算式为

$$y_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2 + m_3} \times 100\% \tag{6}$$

$$S_b = \frac{m_a - m_4}{m_a} \times 100\% \tag{7}$$

式中 y_1 ——油莎豆埋果率,%
 m_1 ——试验区域地面上油莎豆块茎质量,g
 m_2 ——试验区域埋在土中油莎豆块茎质量,g
 m_3 ——试验区域收获的油莎豆块茎质量,g
 S_b ——土壤破碎率,%

m_a ——测定区内全耕层土块总质量,g
 m_4 ——测定区内最长边大于 3 cm 的土块质量,g

3.4.2 试验结果与分析

为检验设计的旋耕刀排列方式的作业性能,进行旋耕刀排列方式对比试验,结果如表 7 所示。

表 7 田间性能试验对比

Tab. 7 Field performance test comparison

序号	新型排列组合		普通排列组合	
	埋果率/%	土壤破碎率/%	埋果率/%	土壤破碎率/%
1	1.95	90.52	2.12	88.70
2	1.83	91.50	2.16	87.74
3	1.58	90.75	2.25	86.23
4	1.76	90.30	1.98	87.54
5	1.62	91.24	1.85	86.87
均值	1.75	90.86	2.07	87.42

试验重复进行 5 次,试验结果表明最优试验参数组合下最高埋果率为 1.95%,最低埋果率为 1.58%,平均值为 1.75%,土壤破碎率最高为 91.50%,最低为 90.30%,平均值为 90.86%;普通旋耕刀组合方式最高埋果率为 2.25%,最低埋果率为 1.85%,平均值为 2.07%,土壤破碎率最高为 88.70%,最低为 86.23%,平均值为 87.42%,通过对比试验发现,最优试验参数组合下在埋果率和土壤破碎率性能方面均优于普通旋耕刀组合方式,埋果率降低了 13.33%,土壤破碎率提高了 3.15%,满足油莎豆的收获要求。

4 结论

(1)使用离散元方法建立油莎豆-土壤-机具的离散元模型,通过分析油莎豆土壤环抱体在旋耕刀作用过程中土壤、根系碎裂的过程来研究油莎豆土壤环抱体各部分的运动规律。

(2)选取特定 3 行油莎豆植株为研究对象,在仿真过程中研究油莎豆根系-块茎-土壤的位移和受力情况,结果表明,各部分的位移和受力曲线整体趋势一致,结合单因素试验得到选旋耕刀相位角 β 为 40°~70°,旋耕刀安装间距 S 为 140~170 mm。

(3)建立了旋耕刀-土壤-油莎豆土壤环抱体离散元模型,进行了油莎豆虚拟仿真挖掘试验,从微观角度分析了油莎豆土壤环抱体各部分运动规律,根据 Design-Expert 试验分析,确定了旋耕刀组合的最佳参数:相位角 61°、安装间距 150 mm,在相同参数设置下与普通旋耕刀组合进行对比试验,埋果率降低了 13.33%,土壤破碎率提高了 3.15%,满足油莎豆收获要求。

参 考 文 献

- [1] 张学昆. 我国油莎豆产业研发进展报告[J]. 中国农村科技, 2019(4): 67–69.
ZHANG Xuekun. Report on the research and development progress of my country's *Cyperus edulis* industry[J]. China Rural Science and Technology, 2019(4): 67–69. (in Chinese)
- [2] 张斌, 刘晶, 范仲学, 等. 盐碱地油莎豆机械化播种收获技术与装备研究进展[J]. 山东农业科学, 2019, 51(4): 144–148.
ZHANG Bin, LIU Jing, FAN Zhongxue et al. Research progress on mechanized seeding and harvesting technology and equipment of *Cyperus edulis* in saline-alkali land[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2019, 51(4): 144–148. (in Chinese)
- [3] 黄明华, 王学华, 庞震宇. 油莎豆的研究现状及展望[J]. 作物研究, 2013, 27(3): 293–295, 301.
HUANG Minghua, WANG Xuehua, PANG Zhenyu. The research status and prospect of *Cyperus serrata*[J]. Crop Research, 2013, 27(3): 293–295, 301. (in Chinese)
- [4] 路战远, 刘和, 张建中, 等. 油莎豆产业发展现状、问题与建议[J]. 现代农业, 2019(6): 11, 13.
LU Zhanyuan, LIU He, ZHANG Jianzhong, et al. The current situation, problems and suggestions of the development of *Cyperus esculentus* industry[J]. Modern Agriculture, 2019(6): 11, 13. (in Chinese)
- [5] 阳振乐. 油莎豆的特性及其研究进展[J]. 北方园艺, 2017(17): 192–201.
YANG Zhenle. Characteristics and research progress of *Cyperus edulis*[J]. Northern Horticulture, 2017(17): 192–201. (in Chinese)
- [6] 杨帆, 朱文学. 油莎豆研究现状及展望[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(7): 4–6.
YANG Fan, ZHU Wenxue. The status quo and prospect of research on *Cyperus esculentus*[J]. Cereals and Oils, 2020, 33(7): 4–6. (in Chinese)
- [7] RAHMAN S, CHEN Y. Laboratory investigation of cutting forces and soil disturbance resulting from different manure incorporation tools in a loamy sand soil[J]. Soil & Tillage Research, 2001, 58(1–2): 19–29.
- [8] LIU J, CHEN Y, KUSHWAHA R L. Effect of tillage speed and straw length on soil and straw movement by a sweep[J]. Soil & Tillage Research, 2010, 109(1): 9–16.
- [9] 方会敏, 姬长英, AHMED Ali Taga, 等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60–67.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED Ali Tagar et al. Simulation analysis of straw displacement in straw–soil–rotary cutter system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60–67. (in Chinese)
- [10] 丁为民, 王耀华, 彭嵩植. 正、反转旋耕刀性能分析及切土扭矩比较试验[J]. 南京农业大学学报, 2001, 28(1): 113–117.
DING Weimin, WANG Yaohua, PENG Songzhi. Performance analysis of forward and reverse rotary tillers and comparative test of soil cutting torque[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2001, 28(1): 113–117. (in Chinese)
- [11] 何晓宁, 张学军, 赵壮, 等. 基于离散元法的油莎豆降阻挖掘装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 124–133.
HE Xiaoning, ZHANG Xuejun, ZHAO Zhuang, et al. Design and experiments of oil soya bean lowering resistance excavation device based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 124–133. (in Chinese)
- [12] 郭俊, 姬长英, 方会敏, 等. 正反转旋耕后土壤和秸秆位移试验分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 21–26.
GUO Jun, JI Changying, FANG Huimin, et al. Experimental analysis on the displacement of soil and straw after rotary tillage by forward and reverse rotation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 21–26. (in Chinese)
- [13] 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: 30–37.
- [14] QI Jiangtao, AN Shiguan, KAN Za, et al. Discrete element-based calibration of simulation parameters of *Cyperus esculentus* L. (tiger nut) planted in sandy soil[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(7): 15631.
- [15] PELLEW A. Advanced soil mechanics[J]. Geotechnical Engineering, 2009, 162(3): 189–190.
- [16] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. 3D DEM tillage simulation: validation of a hysteretic spring (plastic) contact model for a sweep tool operating in a cohesionless soil[J]. Soil & Tillage and Research, 2014, 144(1): 220–227.
- [17] BECHERT D W, BRUSE M, HAGE W, et al. Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 338: 59–87.
- [18] 方会敏, 姬长英, FARMAN Ali Chandio, 等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 22–28.
FANG Huimin, JI Changying, FARMAN Ali Chandio, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 22–28. (in Chinese)
- [19] 高玉兰. 基于离散元法的反旋秸秆还田机仿真优化及试验研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019.
GAO Yulan. Simulation optimization and experimental research of reverse-rotating straw return machine based on discrete element method[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [20] 黄玉祥, 杭程光, 苑梦婵, 等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 80–88.

HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, et al. Discrete element simulation and experiment on the disturbance behavior of deep loose soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 80 – 88. (in Chinese)

[21] 樊昱. 基于离散元法的马铃薯挖掘机理研究及仿生铲设计[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
FAN Yu. Research on potato mining mechanism and bionic shovel design based on discrete element method[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[22] WANG Xiuzhi, YANG Shengqiang, LI Wenhui, et al. Vibratory finishing co-simulation based on ADAMS-EDEM with experimental validation[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(1 – 4): 1175 – 1185.

[23] 赵淑红, 王加一, 杨超, 等. 保护性耕作破茬碎土刀设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 57 – 68.
ZHAO Shuhong, WANG Jiayi, YANG Chao, et al. Design and experiment of soil-breaking knife for conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 57 – 68. (in Chinese)

[24] 祝英豪, 夏俊芳, 曾荣, 等. 基于离散元的稻板田旋耕功耗预测模型研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 42 – 50.
ZHU Yinghao, XIA Junfang, ZENG Rong, et al. Research on power consumption prediction model of paddy field rotary tillage based on discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 42 – 50. (in Chinese)

(上接第 26 页)

[18] 王醒策, 张汝波, 顾国昌. 基于势场栅格法的机器人全局路径规划[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(2): 170 – 174.
WANG Xingce, ZHANG Rubo, GU Guochang. Potential grid based global path planning for robots[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2003, 24(2): 170 – 174. (in Chinese)

[19] 郝宗波, 洪炳钢, 黄庆成. 基于栅格地图的机器人覆盖路径规划研究[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(10): 56 – 58.
HAO Zongbo, HONG Bingrong, HUANG Qingcheng. Study of coverage path planning based on grid-map[J]. Application Research of Computers, 2007, 24(10): 56 – 58. (in Chinese)

[20] 邹永贵, 魏来. 带多约束条件的最优路径选择算算法研究[J]. 计算机应用, 2008, 28(5): 1101 – 1103, 1110.
ZOU Yonggui, WEI Lai. Optimal path algorithm with multi-constrained condition[J]. Journal of Computer Applications, 2008, 28(5): 1101 – 1103, 1110. (in Chinese)

[21] LIU Jingxian, LI Huanhuan, YANG Zaili, et al. Adaptive Douglas – Peucker algorithm with automatic thresholding for AIS-based vessel trajectory compression[J]. IEEE Access, 2019, 7: 150677 – 150692.

[22] ALASADI T A, BAIEE W R. Improved douglas-peucker algorithm with dynamic threshold values[J]. International Journal of Digital Content Technology and Its Applications, 2014, 8(6): 61 – 67.

[23] MICHEL T, PHILIPPE S, HELENE F, et al. Path planning for complete coverage with agricultural machines[J]. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2006, 24: 549 – 558.

[24] TIMO O, VISALA A. Coverage path planning algorithms for agricultural field machines[J]. Journal of Field, 2009, 26(8): 651 – 668.

[25] CHOSET H, PIGNON P. Coverage path planning: the boustrophedon cellular decomposition [C] // Proceedings of the International Conference on Field and Service Robotics, Canberra, Australia, 1997: 203 – 209.

[26] RESSELL R A, THIEL D, MACKAY – SIM A. Recruiting swarm robots using coded odor trails [C] // Proceedings of the 1st Conference on Field and Service Robotics, Canberra, Australia, 1997: 451 – 455.

[27] 王建波, 赵玉芹, 朱晨辉, 等. 自动导航拖拉机田间作业路径规划与应用试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(2): 242 – 245.
WANG Jianbo, ZHAO Yuqin, ZHU Chenhui, et al. Field-work path planning for tractor with automatic navigation and practical application[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(2): 242 – 245. (in Chinese)

[28] 黄小毛, 付正坤, 丁幼春, 等. 矩形边界条件下农机作业方向平行路径的排序优化[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(4): 130 – 136.
HUANG Xiaomao, FU Zhengkun, DING Youchun, et al. Sequence optimization of direction parallel path for the agricultural vehicles in field of rectangle boundary[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(4): 130 – 136. (in Chinese)

[29] 袁佳泉, 李胜, 吴益飞, 等. 基于模拟退火蚁群算法的机器人路径规划方法[J]. 计算机仿真, 2019, 36(10): 329 – 333.
YUAN Jiaquan, LI Sheng, WU Yifei, et al. Robot path panning method based on simulated annealing ant colony algorithm [J]. Computer Simulation, 2019, 36(10): 329 – 333. (in Chinese)

[30] 巩敦卫, 曾现峰, 张勇. 基于改进模拟退火算法的机器人全局路径规划[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(3): 480 – 483, 488.
GONG Dunwei, ZENG Xianfeng, ZHANG Yong. Global path planning method of robot based on modified simulated annealing algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(3): 480 – 483, 488. (in Chinese)