doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.013

基于离散元法的油莎豆降阻挖掘装置设计与试验

何晓宁[1,2]　张学军[1]　赵　壮[2]　尚书旗[2]　王东伟[2]　袁小伟[1]
(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:目前油莎豆机械化收获方式以正旋旋耕挖掘为主,但工作过程中存在工作阻力大、碎土率低、埋果率高等问题,本文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,结合 EDEM 进行挖掘过程离散元仿真试验,确定影响旋耕刀工作阻力和刀轴扭矩的结构参数和取值范围,利用 Design-Expert 进行试验优化与回归分析,确定旋耕刀的最佳结构参数为:弯折角 130°、工作幅宽 45 mm,在相同参数设置下与正旋旋耕方式进行对比试验,工作阻力降低了 8.6%,刀轴扭矩降低了 5.9%,证明反旋挖掘具有降阻作用。为检验优化设计的旋耕刀作业性能,以埋果率和土壤破碎率作为试验指标进行对比试验,结果表明:反旋作业方式埋果率 1.07%,土壤破碎率 93.48%,与标准旋耕刀相比,新型旋耕刀油莎豆块茎埋果率减低了 1.2 个百分点,土壤破碎率提高了 1.3 个百分点。

关键词:油莎豆收获机;团聚体;旋耕刀;离散元法
中图分类号:S222.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2021)12-0124-10　　**OSID**:

Design and Test of Resistance-reducing Excavation Device of *Cyperus edulis* Based on Discrete Element Method

HE Xiaoning[1,2]　ZHANG Xuejun[1]　ZHAO Zhuang[2]　SHANG Shuqi[2]　WANG Dongwei[2]　YUAN Xiaowei[1]
(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: At present, the mechanized harvesting method of *Cyperus edulis* is mainly forward rotary tillage excavation, but there are problems in the work process such as large working resistance, low soil fragmentation rate and high fruit burying rate. The discrete element model of the rotary tiller and the cedar agglomerates was analyzed and established, the discrete element simulation test of the excavation process was carried out combined with EDEM, and the structural parameters and value ranges that affected the rotary tiller's working resistance and the torque of the tool shaft were determined. Design-Expert experiment optimization and regression analysis were carried out to determine the best structural parameters of the rotary tiller, which were as follows: bending angle of 130°, working width of 45 mm, compared with the normal rotary tillage method under the same parameter settings, the working resistance was reduced by 8.6%, the torque of the cutter shaft was reduced by 5.9%, which proved that the anti-rotating excavation had the effect of reducing resistance. In order to test the performance of the optimized rotary tiller, the fruit burying rate and the soil breaking rate were used as the test indicators to conduct a comparative test. The results showed that the reverse rotary operation method had a fruit burying rate of 1.07% and a soil broken rate of 93.48%, which were compared with the standard rotary cultivator. Compared with the new type rotary scalper, the burial rate of tubers of *Cyperus edulis* was reduced by 1.2 percentage points, and the soil broken rate was increased by 1.3 percentage points, which improved the harvesting efficiency of *Cyperus edulis*.

Key words: *Cyperus edulis* harvester; agglomerate; rotary tiller; discrete element method

收稿日期:2021-07-13　修回日期:2021-09-24
基金项目:新疆维吾尔自治区科技支疆项目(2020E02112)和河南省重大科技专项(211100110100)
作者简介:何晓宁(1988—),男,讲师,青岛农业大学博士生,主要从事根茎类作物机械化研究,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

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，具有适应性广、含油量高、营养价值高等特性[3-4]。目前，我国大多数地区油莎豆收获以正旋旋耕和挖掘铲式作业方式为主，但是由于正旋挖掘方式存在埋果率高、壅土严重，挖掘铲式存在挖掘阻力大、土壤破碎率低等问题[5-6]，无法满足油莎豆规模化收获要求。国内外学者近年来对旋耕机理进行深入研究，ASAF 等[7]研究了旋耕刀动力预测模型，推导了旋耕刀对土壤切削时的支反作用力和扭力方程，阐明了挖掘阻力产生的原理，ROSA 等[8]利用有限元方法模拟出刀具耕作时的工作情况，在以不同耕速比为变量前提下，得出刀具不同结构参数对于性能指标的影响，LEE 等[9]基于旱地水稻直播机的旋耕部件，研究旋耕刀在不同结构参数和工作参数下对旋耕作业扭矩、碎土率的影响。

文献[10－11]基于深松部件、旋耕部件作业之间的交互作用，设计了一种用于深耕的反旋深松联合作业耕整机，相比于普通深松旋耕联合整地机，牵引阻力降低了 16.21%，方会敏等[12]建立了秸秆-土-旋耕刀离散元模型，进行 EDEM 仿真试验和田间试验对比，结果显示秸秆位移随着转速增加呈现增加的趋势，秸秆的水平运动位移总是大于同转速下的侧向位移，同时阐明了土壤的破碎机理，郭俊等[13]为研究正、反旋两种旋耕方式在不同转速下土壤和秸秆位移情况，运用示踪法原理，对铝块和秸秆进行标记，试验结果表明反转旋耕破碎率优于正旋。其他相关研究主要针对土壤破碎性能设计一种旋耕装置，未结合油莎豆种植模式和收获模式，适应性差，无法满足油莎豆收获基本要求。

本文基于离散元原理与旋耕刀-油莎豆团聚体力学模型，以反旋作业方式进行运动学以及旋耕刀结构参数分析，建立油莎豆团聚体离散元模型，通过 EDEM 仿真试验，分析反转旋耕刀结构参数对试验指标影响规律，结合试验结果，设计一种高效破土旋耕刀，以期解决油莎豆联合收获过程中挖掘阻力大、土壤破碎率低、埋果率高等问题。

1　油莎豆植株特性分析

由于油莎豆植株成簇生长，收获期时根系发达且含土量高[14]，如图 1 所示。本文针对油莎豆种植模式进行试验分析，发现河南民权地区油莎豆种植特点：行距 15～20 cm，株距 12～16 cm，生长深度为 12～15 cm，为挖掘装置结构参数设计提供依据。



图 1　油莎豆团聚体

Fig. 1　*Cyperus edulis* agglomerates

为保证后续仿真试验的精准性和科学性，结合河南民权地区油莎豆种植土壤特点，通过五点取样法进行土壤性质测定，得到其不同深度的土壤含水率、密度以及土壤坚实度，如表 1 所示。

表 1　土壤物性参数

Tab. 1　Soil physical 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
150～200	22.58	1.64	956
平均值	20.60	1.54	747.5

2　旋耕刀反旋工作原理

2.1　旋耕刀运动分析

当反转旋耕刀切削土壤时，旋耕刀在任何时刻的绝对速度都是由机器前进速度和刀轴转速矢量合成，运动轨迹模型如图 2 所示，设 A 为旋耕刀刀尖，其坐标为(X,Y)，其运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = R\cos(\omega t) + v_m t = R\left(\cos\alpha + \dfrac{\beta}{\lambda}\right) \\ y = R\sin(\omega t) = R\sin\beta \end{cases} \tag{1}$$

式中　v_m——前进速度，m/s

R——刀轴回转半径，mm

α——弯折角，(°)

ω——刀轴角速度，rad/s

t——刀轴运动时间，s

β——旋耕刀转动角，(°)

λ——旋耕速比

对式(1)求导可得刀尖 $A(X,Y)$ 处在 x 和 y 方向的分速度为

$$\begin{cases} v_x = \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = v_m - R\omega\sin(\omega t) = v_m(1 - \lambda\sin\alpha) \\ v_y = \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = R\omega\cos(\omega t) = R\omega\cos\alpha \end{cases} \tag{2}$$

刀尖 A 处绝对速度为

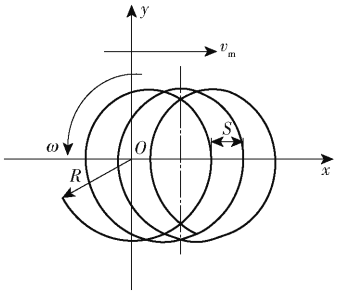


图 2 反转旋耕作业运动轨迹

Fig. 2 Movement trajectory of reverse rotary tillage operation

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \tag{3}$$

联立式(2)、(3)可得

$$v = v_m \sqrt{\lambda^2 + 1 - 2\lambda \sin\alpha} \tag{4}$$

其中 $$\lambda = \frac{R\omega}{v_m}$$

λ 直接影响旋耕刀的运动轨迹、切土节距以及机器功率损等工作性能。

切土节距计算式为

$$S = v_m t = \frac{60 v_m}{Zn} \tag{5}$$

式中 S——切土节距,mm

Z——刀轴上同一径向旋耕刀数量

n——旋耕刀转速,r/min

与正旋挖掘相比,机器以反旋的工作方式作业时,可以在低速下进行挖掘作业,保证机器在较低功耗下实现较高的土壤破碎率,提高机具的作业性能,同时土垡切削量小且稳定,作业后土壤颗粒层次分布,通透性好,利于后续耕整地作业[15]。

2.2 旋耕刀结构参数分析

在油莎豆反转挖掘收获过程中,旋耕刀正切刃和刀端弯曲部位首先开始切削土壤,然后正切刃由下至上切削土壤,正切面的主要功能为切土、碎土、抛土等,是反转旋耕刀重要组成结构,其结构形状和参数对于挖掘性能有着重要影响,其中影响正切面的结构参数主要有回转半径 R、弯折角 α 以及单刀工作幅宽 L[16],如图 3 所示。本文结合油莎豆种植模式研究,将回转半径设为 150 mm,通过改变弯折角 α 以及单刀工作幅宽 L 来改变正切面参数,进一步提高正切面的抛土性能,通过 EDEM 仿真探究其最佳结构参数组合。

3 离散元模型建立

3.1 土壤模型

结合前面对于土壤的特性分析,本文以参数平均值建立土壤颗粒床模型,在确保试验精度的前提下,将土壤颗粒进行适当放大,将土壤颗粒半径设为 5 mm,同时为了确保土壤环境的真实性,采用颗粒组合的方式将土壤颗粒模型设置为以下 4 种模型[17-19],即粒状颗粒、团粒状颗粒、块状颗粒、杆状颗粒,如图 4 所示。

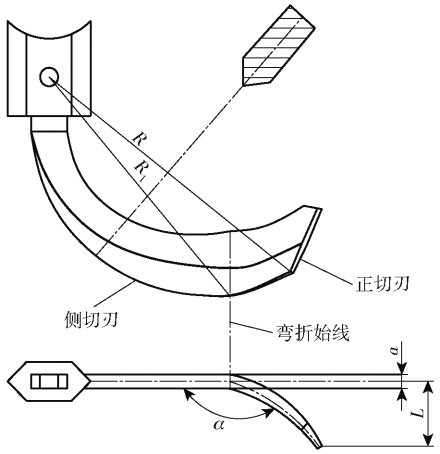


图 3 旋耕刀结构图

Fig. 3 Structure diagram of rotary tiller

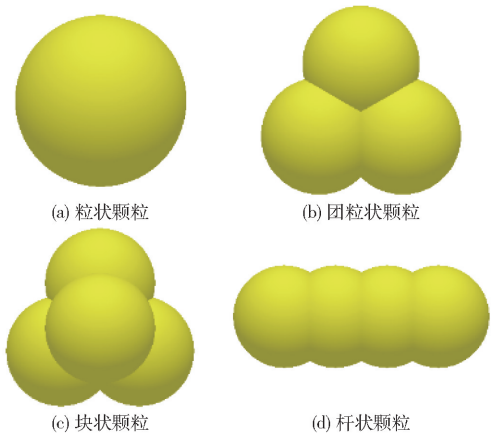


图 4 土壤颗粒模型

Fig. 4 Soil particle models

3.2 油莎豆块茎建模

在实际油莎豆收获过程中,油莎豆块茎是挖掘过程中油莎豆团聚体主要组成部分,很多学者在模拟试验时,基本都忽略油莎豆块茎的影响[20]。为精准模拟在收获过程中油莎豆块茎与根系连接力破坏的影响规律,本文利用三维激光扫描技术确定油莎豆块茎的形状特征及三维尺寸,对油莎豆块茎的形状结构进行扫描、曲面重构,得出块茎的几何体模型,利用 EDEM 软件中的填充功能完成块茎离散元模型的建立,对油莎豆块茎三维尺寸进行试验分析,油莎豆块茎长为 12 mm,宽为 10 mm,高为 8 mm,如图 5 所示。

3.3 油莎豆根系模型

为精准模拟油莎豆收获机在工作过程中旋耕刀与油莎豆团聚体的接触规律,建立油莎豆根系离散元模型。由于油莎豆根系具有柔软、细长以及方向



图 5　油莎豆块茎离散元模型

Fig. 5　Discrete element model of *Cyperus esculentus* tuber

不一致等特点[21]，本文对油莎豆根系建模进行简化处理，建立根系主要须茎，通过试验统计与分析，油莎豆根系长度范围为 90 ~ 120 mm，半径为 0.05 ~ 0.2 mm，结合对油莎豆根系长度的试验分析，通过颗粒组合的形式将油莎豆根系长度设为 120 mm，如图 6 所示。

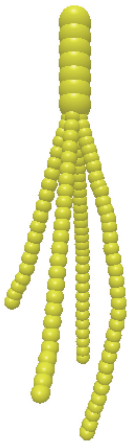


图 6　油莎豆离散元模型

Fig. 6　*Cyperus esculentus* discrete element model

3.4　接触模型及参数设定

3.4.1　接触模型

为精准模拟河南民权地区粘性土壤性质，土壤颗粒之间的接触模型选择 Hertz - Mindlin with Bonding 模型，如图 7 所示，该模型可以通过结合力将相邻 2 个土壤颗粒粘结在一起，结合力可以承受切向和法向位移[22-24]。在实际田间作业过程中，土壤与土壤之间存在粘附力，挖掘铲与土壤存在受力关系，该模型可以模拟土壤颗粒之间的粘结作用和土壤颗粒破碎的现象。

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

$$\begin{cases} \delta F_n = -v_n k_n A \delta_t \\ \delta F_t = -v_t k_t A \delta_t \\ \delta T_n = -\omega_n k_n A \delta_t \\ \delta T_t = -\omega_t k_t \dfrac{J}{2} \delta_t \end{cases} \tag{6}$$

其中

$$\begin{cases} A = \pi R_a^2 \\ J = \dfrac{1}{2} \pi R_a^4 \end{cases} \tag{7}$$

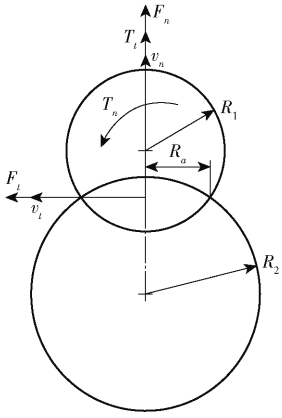


图 7　土壤接触颗粒模型

Fig. 7　Soil contact particle model

式中　F_n——法向接触力，N

F_t——切向接触力，N

T_n——法向力矩，N·m

T_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，mm^2

J——惯性矩，mm^4

δ_t——时间步长，s

R_a——颗粒粘结半径，mm

土壤颗粒间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 σ_{max}、τ_{max}，当粘结键断裂时，有

$$\begin{cases} \sigma_{max} < \dfrac{-F_n}{A} + \dfrac{2T_t}{J} R_a \\ \tau_{max} < \dfrac{-F_t}{A} + \dfrac{T_n}{J} R_a \end{cases} \tag{8}$$

3.4.2　离散元参数设定

为了确保仿真试验的准确性，本文通过参数试验以及查阅文献[25]，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。

3.5　虚拟仿真试验过程

为模拟油莎豆挖掘装置实际作业状态，根据河南民权地区油莎豆种植模式，运用 EDEM 建立长 1 200 mm、高 400 mm 虚拟土槽，其中油莎豆株距 120 mm，行距 150 mm，如图 8 所示。

在虚拟仿真试验过程中，将旋耕刀前进速度设置为 0.5 m/s，刀轴转速 30 r/min，旋耕刀弯折角 110°，旋耕刀工作幅宽 30 mm；为保证仿真过程精确

表 2 离散元参数

Tab. 2 Discrete element parameter values

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

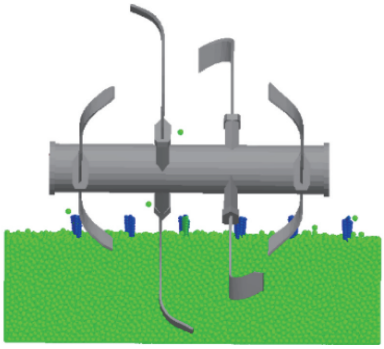


图 8 土壤-旋耕刀-油莎豆团聚体模型

Fig. 8 Soil - rotary cutter - *Cyperus edulis* aggregate model

性和连续性,设置仿真步长为 3.14×10^{-6}[26-28],网格单元尺寸 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 0.4 s,仿真时长 2 s,通过仿真试验可得到旋耕刀对土壤的破碎情况,从 EDEM 后处理工具中导出旋耕刀所受阻力以及土壤破碎率的实时数据。

4 仿真试验

4.1 挖掘过程动态分析

工作阻力是衡量联合收获机综合性能的主要技术参数,在旋耕刀工作过程中,通过 EDEM 后处理分析不同时刻下挖掘铲与油莎豆团聚体破坏动态过程,如图 9、10 所示。

油莎豆反转旋耕作业过程中(图 9、10),旋耕刀正切刃和刀端弯曲部位首先开始切削底层土壤,土壤垂直于旋耕刀尖上向上方及两侧运动,深层土壤被打破,随着旋耕刀不断对中部土层进行剪切、撕裂、翻转、抛掷等作用,土壤失效区域范围变大,呈松散状态,油莎豆块茎和油莎豆根系受到扰动,如图 10所示,土壤呈红色状态,逐渐沿旋耕刀尖切线方向运动,在旋耕刀往复作用下油莎豆团聚体在被破坏的同时被抛起,完成反转挖掘过程。

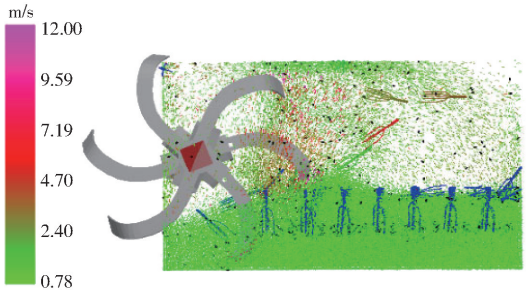


图 9 离散元仿真试验矢量图

Fig. 9 Vector diagram of discrete element simulation test

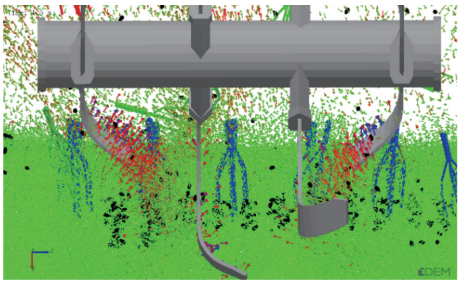


图 10 离散元仿真试验局部放大图

Fig. 10 Partial enlarged view of discrete element simulation test

4.2 单因素试验设计

为探究影响挖掘作业质量的主要因素取值范围,以弯折角 α 以及单刀工作幅宽 L 为试验因素进行单因素试验,以工作阻力和刀轴扭矩为试验指标,由上述旋耕刀结构参数分析可知,油莎豆反转作业质量与弯折角 α 以及单刀工作幅宽 L 因素密切相关,根据河南油莎豆种植农艺要求,选取弯折角为 90°~170°,工作幅宽为 25~65 mm 研究其对工作阻力和刀轴扭矩的影响规律,为后续多因素试验提供理论基础。

4.2.1 单因素试验

根据 EDEM 仿真数据,导出工作阻力和刀轴扭矩在不同仿真时间段的变化规律,如图 11、12 所示。在旋耕刀工作过程中,当旋耕刀未接触土壤时工作阻力和刀轴扭矩为 0,随着刀轴的转动,旋耕刀开始切削土壤,所受工作阻力和刀轴扭矩开始逐渐增大,随着切削运动的进行,旋耕刀切削土壤的体积不断增加,当旋耕刀开始接触油莎豆团聚体,对油莎豆团聚体进行破坏,旋耕刀所受阻力瞬间增大,在旋耕刀与油莎豆团聚体破坏过程中耕深达到最大值时,所受阻力达到最大值;当旋耕刀越过最大耕深时,切土体积逐渐减少,所受阻力相应减少;由于旋耕刀在切削土壤时每转过一定的角度都有相同的 4 把旋耕刀进入土壤,因此刀轴在工作时受到的总阻力呈现周期性变化。

4.2.2 弯折角 α 对试验指标的影响

固定旋耕刀前进速度 0.5 m/s,刀轴转速

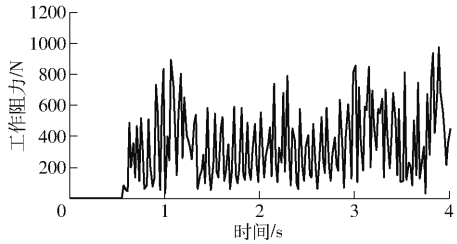


图 11　工作阻力变化曲线

Fig. 11　Working resistance change curve

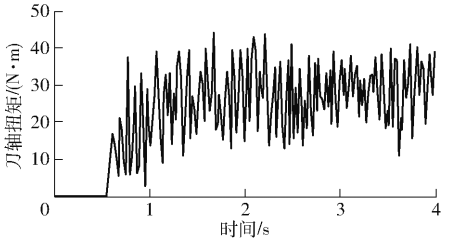


图 12　刀轴扭矩变化曲线

Fig. 12　Torque curve of cutter shaft

30 r/min，旋耕刀工作幅宽 30 mm，弯折角 α 分别取 90°、110°、130°、150°和 170°，进行 5 组仿真试验，以工作阻力和刀轴扭矩作为试验指标，观察旋耕刀所受三向阻力最大值的变化规律，如图 13、14 所示。在弯折角 90°～150°范围内，弯折角的变化对于工作阻力影响较为显著，旋耕刀所受三向阻力逐渐增加，在 150°～170°之间，弯折角的变化对于工作阻力影响较低，旋耕刀所受三向阻力变化较为平稳；当弯折角在 90°～170°范围内，对于 x 方向刀轴扭矩先增加至 51 N，然后逐渐降低趋于平稳，当弯折角在 90°～150°范围内，对于 y、z 方向刀轴扭矩变化影响显著，在 150°～170°区间范围内其刀轴扭矩变化趋于平稳。

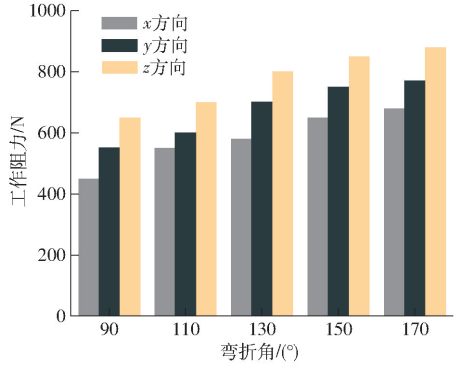


图 13　弯折角对工作阻力的影响

Fig. 13　Influence of bending angle on working resistance

4.2.3　工作幅宽 L 对工作阻力的影响

固定旋耕刀前进速度 0.5 m/s，刀轴转速 30 r/min，弯折角 90°，旋耕刀工作幅宽 L 分别取 25、35、45、55、65 mm，进行 5 组仿真试验，旋耕刀所受三向阻力最大值随转速的变化情况如图 15、16 所示。当工作幅宽在 25～55 mm 区间范围内，x、z 方向工作阻力逐渐增加，工作幅宽的变化对于 x 方向工作阻力影响较为显著，在 55～65 mm 之间，x 方向工作阻力变化较为平稳；工作幅宽在 25～55 mm 区间范围内，对于 y 方向工作阻力变化影响显著，在 55～65 mm 范围其工作阻力有略微下降趋势，但阻力波动范围较小；当工作幅宽在 25～55 mm 区间范围内，对于 x 方向刀轴扭矩变化影响显著，但工作幅宽在 55～65 mm 内其刀轴扭矩略微下降，当工作幅宽在 25～55 mm 区间范围内，y、z 方向刀轴扭矩逐渐增加，在 55～65 mm 之间，刀轴扭矩变化较为平稳。

根据以上分析，为得到最佳旋耕刀结构参数，选取弯折角 110°～150°，工作幅宽 35～55 mm 为试验因素取值范围。

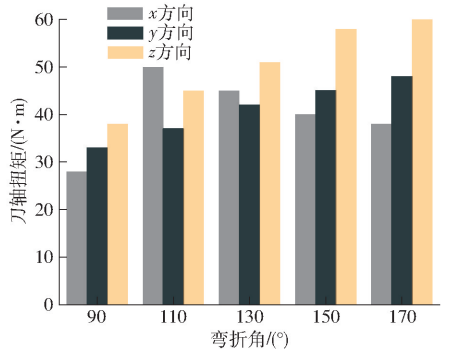


图 14　弯折角对刀轴扭矩的影响

Fig. 14　Influence of bending angle on torque of cutter shaft

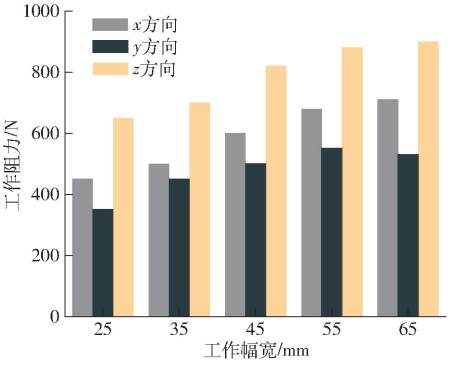


图 15　工作幅宽对工作阻力的影响

Fig. 15　Influence of working width on working resistance

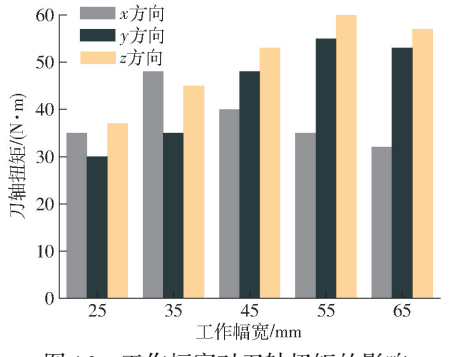


图 16　工作幅宽对刀轴扭矩的影响

Fig. 16　Influence of working width on torque of cutter shaft

4.3 多因素仿真试验

在前期油莎豆团聚体离散元模型建立及旋耕刀动力学分析的基础上,为得到理想的旋耕刀结构参数组合,进行 EDEM 正交旋转虚拟仿真试验研究,结合前期理论分析和单因素试验结果,设定试验因素编码如表 3 所示。

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Test factors coding

编码	因素	
	弯折角 α/(°)	工作幅宽 L/mm
-1.414	110	35
-1	116	38
0	130	45
1	144	52
1.414	150	55

以弯折角 α、工作幅宽 L 为试验因素,采用二因素五水平二次正交旋转组合设计进行旋耕刀虚拟仿真试验,根据所得数据进行结果分析,并对影响指标的主要因素进行显著性分析,试验结果如表 4 所示,表中 A、B 为编码值。

表 4 仿真试验结果

Tab. 4 Simulation test results

序号	因素		工作阻力	刀轴扭矩
	弯折角 A	工作幅宽 B	y_1/N	y_2/(N·m)
1	-1	-1	889.62	27.66
2	1	-1	1 059.34	32.75
3	-1	1	989.83	30.86
4	1	1	1 181.24	36.55
5	-1.414	0	926.86	25.93
6	1.414	0	1 256.85	30.13
7	0	-1.414	725.85	28.13
8	0	1.414	759.56	41.25
9	0	0	829.39	29.04
10	0	0	496.84	32.33
11	0	0	676.83	33.26
12	0	0	786.36	35.23
13	0	0	726.41	29.78
14	0	0	665.94	29.05
15	0	0	698.35	29.56
16	0	0	745.66	30.25

对表 4 数据进行二次多元回归拟合,得到工作阻力和刀轴扭矩对编码自变量的二次多元回归方程

$$y_1 = 703.22 + 103.48A + 33.72B + 5.42AB + 222.50A^2 + 47.92B^2 \quad (9)$$

$$y_2 = 31.06 + 2.09A + 3.19B + 0.15AB - 1.37A^2 + 1.96B^2 \quad (10)$$

同时经过 Design-Expert 软件处理后得到关于工作阻力和刀轴扭矩的方差分析结果如表 5、6 所示。

表 5 工作阻力方差分析

Tab. 5 Working resistance analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方和	F	P
模型	5.093×10^5	5	1.019×10^5	10.14	<0.01 **
A	85 657.92	1	85 657.92	8.52	0.015 3 *
B	9 097.87	1	9 097.87	0.91	0.363 8
AB	117.61	1	117.61	0.012	0.916 0
A^2	3.96×10^5	1	3.96×10^5	39.41	<0.01 **
B^2	18 373.01	1	18 373.01	1.83	0.206 1
失拟	30 611.01	3	10 203.67	1.02	0.438 6
误差	69 872.71	7	9 981.82		
总和	6.098×10^5	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 刀轴扭矩方差分析

Tab. 6 Analysis of variance of cutter shaft torque

来源	平方和	自由度	均方和	F	P
模型	162.43	5	32.49	5.72	<0.01 **
A	34.94	1	34.94	6.15	0.032 8 *
B	81.63	1	81.63	14.36	<0.01 **
AB	0.09	1	0.090	0.016	0.902 4
A^2	14.96	1	14.96	2.63	0.135 1
B^2	30.81	1	30.81	5.42	0.042 8 *
失拟	20.32	3	6.77	1.30	0.347 0
误差	36.51	7	5.22		
总和	219.27	15			

由表 5 可知,模拟的一次项弯折角 A 对工作阻力的影响显著,二次项 A^2 对工作阻力影响极其显著。从单因素水平分析,各项因素对工作阻力的影响由大到小为弯折角 A、工作幅宽 B。响应面分析如图 17 所示。

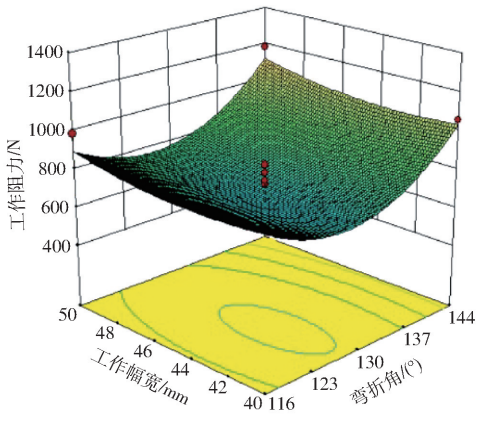


图 17 试验因素对工作阻力的影响曲面

Fig. 17 Influence surface of test factors on working resistance

由表 6 可知,模拟的一次项工作幅宽 B 对刀轴扭矩的影响极其显著,一次项弯折角 A 和二次项 B^2 对刀轴扭矩影响显著。从单因素水平分析,各项因素对工作阻力的影响由大到小为工作幅宽 B、弯折角 A,响应面分析如图 18 所示。

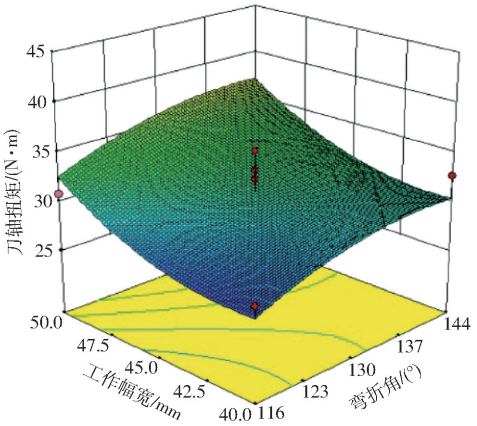


图 18　试验因素对刀轴扭矩的影响曲面

Fig. 18　Influence of test factors on torque of cutter shaft

4.4　试验优化

为得到试验因素最佳旋耕刀结构参数组合，对试验进行优化设计。建立参数化数学模型，结合试验因素的边界条件，以降低工作阻力和刀轴扭矩为目标，对旋耕刀工作阻力和刀轴扭矩进行回归分析，建立非线性规划参数模型为

$$\begin{cases} \min y_1 \\ \min y_2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} 110° \leqslant \alpha \leqslant 150° \\ 35\ \text{mm} \leqslant L \leqslant 55\ \text{mm} \end{cases} \end{cases} \tag{11}$$

利用 Design-Expert 对数学模型进行分析求解，弯折角 130°、工作幅宽 45 mm 为最优参数组合，此时工作阻力为 703.22 N，刀轴扭矩 32.06 N·m，将最优参数进行 EDEM 虚拟仿真试验验证，其工作阻力为 928.63 N，刀轴扭矩 34.56 N·m，与优化结果基本一致。在相同参数设置下与目前正旋旋耕挖掘装置进行试验对比，结果表明，正旋挖掘装置工作阻力为 1 015.52 N，刀轴扭矩为 36.72 N·m，工作阻力降低了 8.6%，刀轴扭矩降低了 5.9%，验证了反旋式旋耕刀片具有一定的降阻作用。

5　田间试验

5.1　田间试验条件与方案

旋耕刀挖掘阻力和刀轴扭矩并不是衡量作业效果主要标准，由于油莎豆目前无相关收获作业标准，本文参考 NY/T 502—2016 中的收获标准以及 GB/T 5668—2017 中的土壤破碎率计算方法，将埋果率和土壤破碎率作为田间试验的指标，目的是检验优化设计的旋耕刀作业性能，结合理论分析与仿真模拟结果进行田间验证，试验地点选择河南省民权县油莎豆种植基地，该地区油莎豆种植模式为平作，行距为 140 mm，株距为 120 mm，油莎豆生长深度 160 mm 左右，如图 19 所示。



图 19　油莎豆种植深度测量

Fig. 19　Planting depth measurement of *Cyperus edulis*

试验划为 5 个区域，每个试验区域长 50 m，将新型旋耕刀和 IT245 旋耕刀分别安装在油莎豆联合收获机上，进行油莎豆收获性能对比分析。机器作业速度设置为 0.5 m/s，将埋果率和土壤破碎率作为试验指标，进行试验分析，如图 20 所示。



图 20　油莎豆田间试验

Fig. 20　Field trial of *Cyperus serrata*

5.2　田间试验结果与分析

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	新型旋耕刀		标准旋耕刀	
	埋果率	土壤破碎率	埋果率	土壤破碎率
1	1.10	93.52	1.75	92.56
2	1.23	94.61	2.32	91.74
3	0.85	92.75	2.56	92.23
4	1.21	93.86	1.89	91.54
5	0.98	92.67	2.85	92.87
均值	1.07	93.48	2.27	92.18

由表 7 可知，新型旋耕刀作业时埋果率最高值为 1.23%，最低值为 0.85%，平均值为 1.07%，土壤破碎率最高值为 94.61%，最低值为 92.67%，平均值为 93.48%，标准旋耕刀埋果率最高为 2.85%，最低为 1.75%，平均值为 2.27%，土壤破碎率最高为 92.87%，最低为 91.54%，平均值为 92.18%，与标准旋耕刀相比，新型旋耕刀油莎豆块茎埋果率减低了 1.20 个百分点，土壤破碎率提高了 1.3 个百分点，参考 NY/T 502—2016 的规定，进一步提高了油莎豆的收获效率。

6 结论

(1)通过对旋耕刀进行运动学分析和结构分析,结合虚拟仿真试验,得到旋耕刀结构参数弯折角取值范围为 110° ~150°,工作幅宽取值范围为 35 ~ 55 mm。

(2)建立了旋耕刀-土壤-油莎豆团聚体离散元模型,进行了油莎豆虚拟仿真挖掘试验,从微观角度分析了土壤破碎的动态过程和油莎豆团聚体的速度关系,根据 Design-Expert 试验分析,确定了旋耕刀的最佳结构参数:弯折角 130°,工作幅宽 45 mm,在相同参数设置下与正旋旋耕方式进行对比试验,工作阻力降低了 8.6%,刀轴扭矩降低了 5.9%,证明反旋挖掘具有降阻作用。

(3)为验证反旋刀片设计的合理性,以埋果率和土壤破碎率进行油莎豆收获性能试验,同时与标准旋耕刀进行试验对比,结果表明:反旋作业方式埋果率 1.07%,土壤破碎率 93.48%,与标准旋耕刀相比,新型旋耕刀油莎豆块茎埋果率减低了 1.2 个百分点,土壤破碎率提高了 1.3 个百分点。

参 考 文 献

[1] 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 current situation and prospects of research on *Cyperus esculentus*[J]. Cereals and Oils,2020,33(7):4 -6. (in Chinese)

[2] 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)

[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] 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.

[5] 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)

[6] 谢年保,黄明星,陈欣,等. 油莎豆栽培技术及产业化开发[J]. 作物研究,2005(2):132 -133.
XIE Nianbao,HUANG Mingxing,CHEN Xin,et al. Cultivation technology and industrial development of *Cyperus esculentus*[J]. Crop Research,2005(2):132 -133. (in Chinese)

[7] ASAF Z, RUBINSTEIN D, SHMULEVISH I. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 92(1 -2): 227 -242.

[8] ROSA U A,WULFSOHN D. Constitutive model for high speed tillage using narrow tools[J]. Journal of Terramechanics,1990,36(4): 221 -234.

[9] LEE K S,PARK S H,PARK W Y, et al. Strip tillage characteristics of rotary tiller blades for use in a dryland direct rice seeder[J]. Soil & Tillage Research,2003,71(1):25 -32.

[10] 郑侃,何进,李洪文,等. 反旋深松联合作业耕整机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(8):61 -71.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of combined tillage machine with reverse rotation and subsoiling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(8):61 -71. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170806&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.006. (in Chinese)

[11] 郑侃,何进,李洪文,等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):62 -72.
ZHENG Kan,HE Jin,LI Hongwen, et al. Research on broken-line soil breaking blade deep loosening shovel based on discrete element deep loosening soil model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(9):62 -72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160910&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010. (in Chinese)

[12] 方会敏,姬长英,AHMED Ali Tagar,等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(1):60 -67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160109&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.009. (in Chinese)

[13] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(5):21 -26.

http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160504&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.004.(in Chinese)

[14] 张斌,刘晶,范仲学,等.油莎豆引种试验及绿色高效栽培技术研究进展[J].山东农业科学,2019,51(3):147-150.
ZHANG Bin, LIU Jing, FAN Zhongxue, et al. Research progress on introduction experiment and green and high-efficiency cultivation techniques of *Cyperus serrata*[J]. Shandong Agricultural Sciences,2019,51(3):147-150.(in Chinese)

[15] 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)

[16] 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)

[17] 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/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(7):80-88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160712&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.012.(in Chinese)

[18] 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.

[19] SPOOR G, GODWIN R J. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines[J]. Journal of Agricultural Engineering Research,1978,23(3):243-258.

[20] 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)

[21] 陈惠宗.油莎豆的特征特性及栽培技术[J].基层农技推广,2016(1):97-98.

[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/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(9):57-68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190907&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.007.(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/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(10):42-50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20201006&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.006.(in Chinese)

[25] 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):e15631.

[26] PELLEW A. Soil mechanics[J]. Geotechnical Engineering,2009,162(3):189-190.

[27] 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.

[28] 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.