

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.011

基于离散元的菠菜收获机根切铲优化设计与试验

苑进^{1,2,3} 李金光¹ 邹亮亮^{1,2,3} 刘雪美^{1,2,3}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018;
3. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018)

摘要: 针对菠菜收获过程中收获散乱、根切阻力大等问题,从根土复合体特性着手,分析收获过程中菠菜根、土壤与根切铲之间的互作关系,以优化根系聚拢、减少土壤雍堵和降低铲切阻力,提高菠菜切根效率。设计了一种兼具切根与根系聚拢功能的新型根切铲,建立了根切受力模型,对铲刀的关键参数进行计算优化,确定了铲刀滑切角为60°,刃口角为45°;测定了菠菜根的生物力学特性,建立菠菜根柔性体离散元模型,并基于颗粒接触力学模型的本构方程计算出菠菜根的粘结参数,结合土壤模型建立菠菜根土复合体,并对各项参数进行标定;构建了根切铲与根土复合体的铲切过程仿真,明晰根切铲的工作机理,确定影响切根与根系聚拢性能的主要参数。利用响应面法对根切铲各项参数进行优化,确定根切铲的最优设计参数为:铲翼角76°、铲翼长度占比57%、铲槽面积占比40%。田间根切试验表明:根切合格率均值为93.8%,采收率均值为87.2%。本研究可为菠菜收获机根切机构的研制提供理论指导。

关键词: 菠菜收获; 根切铲; 离散元法; 根土复合体; 设计优化

中图分类号: S225.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0085-14

Optimal Design of Spinach Root-cutting Shovel Based on Discrete Element Method

YUAN Jin^{1,2,3} LI Jinguang¹ ZOU Liangliang^{1,2,3} LIU Xuemei^{1,2,3}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China
3. Shandong Agricultural Equipment Intelligent Engineering Laboratory, Taian 271018, China)

Abstract: In order to settle the problems of loose spinach harvesting and large root-cutting resistance, starting from the characteristics of root-soil composite, the interaction between spinach roots, soil and root-cutting shovel in the harvest process was analyzed to optimize root gathering, reduce soil clogging, reduce shovel cutting resistance, and improve spinach root cutting efficiency. Firstly, a new type of root-cutting shovel with both root-cutting and root-gathering functions was designed. A root-cutting force model was established to calculate and optimize the key parameters of the blade. The blade cutting angle was determined as 60°, and the blade angle was 45°; the biomechanical properties of spinach roots were measured, a discrete element model of spinach roots with flexible body was established, and the bonding parameters of spinach roots were calculated based on the constitutive equation of the particle contact model. The spinach root-soil composite was established in combination with the soil model and the parameters of that were calibrated. A cutting simulation process of the root-soil composite with root-cutting shovel was built to clarify the working mechanism of the root-cutting shovel, and the main parameters that affected the performance of root-cutting and root-gathering were determined. The response surface simulation design was used to optimize the parameters of the root-cutting shovel. The optimal design parameters of the root-cutting shovel were determined as follows: blade angle was 76°, blade length ratio was 57%, and shove groove area ratio was 40%. Field spinach harvesting test showed that the root-cutting average rate was 93.8%, and the harvesting average rate was 87.2%. This research can

收稿日期: 2020-08-05 修回日期: 2020-09-16
基金项目: 国家自然科学基金项目(51675317)和国家重点研发计划项目(2017YFD0701103-3)
作者简介: 苑进(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: jyuan@sdau.edu.cn
通信作者: 刘雪美(1973—),女,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: lxmywj@126.com

provide theoretical guidance for the development of spinach harvester.

Key words: spinach harvesting; root-cutting shovel; discrete element method; root-soil composite; optimization design

0 引言

在国内菠菜生产过程中,收获环节占整个作业量的 40% 左右,且大多由人工完成,存在收获效率低,劳动强度较大等问题^[1-3]。由于采食习惯不同,国外绿叶菜收获机械多采用留茬、无序式采收、成袋包装、低温储运的生产销售模式。在此采收模式下,切割后的叶柄散落无序,不但增加了叶菜污染几率,并且增加了蔬菜保鲜的难度,对之后的包装销售提出了更高的要求,且增加了生产成本。而我国菠菜多为带根收获、打捆销售,采用国外的采收模式并不符合我国的消费习惯。因此国外的绿叶菜类收获机械并不能完全适用于我国的采收农艺。

为解决以上问题,苑进等^[4]提出了一种“破土铲根、夹持拔取”的绿叶菜低损采收模式,可以满足菠菜等绿叶菜带根收获的需求,对菠菜等绿叶蔬菜采收机械的设计具有重要意义。

菠菜等小粒径种子播种中,一般会出现植株定植位置成行不准确、成熟菠菜分行不明显、分布密且散乱等问题。破土铲根是菠菜收获的关键环节,为解决条播种植菠菜一行多株而出现的收获散乱问题,设计了一种新型根切铲,使其兼顾铲根、根茎聚拢和减少土壤雍堵功能,以提高菠菜的收获效率并降低收获损伤。

为实现上述功能,明晰根切过程中根切铲与土壤和根部的互作机理变得尤为重要,其可以为根切铲的结构设计及参数优化奠定基础。但铲切时根土间的作用关系十分复杂,很难采用传统的试验方法对其进行描述,故应建立根土复合体模型,利用仿真模拟的方法对其铲切机理进行探究。

作物生长时,根系会扎在土壤中与土壤紧密结合,从而起到加固土壤的作用,增加吸水性。植物根系与土壤的组合为根土复合体^[5]。目前国内外已有相关学者对根土复合体建模进行了研究。文献[6-7]在各自研究中都利用有限元的方法建立模型。但此方法建模非常复杂,对网格的划分要求极高,且容易造成误差,使仿真结果与实际情况偏离。文献[8]利用离散元模型与刚形体材料结合的方法建立了生菜根系拉拔模型,但进行拉拔仿真时,只能得出拉拔时的摩擦力等参数,无法考虑到根系的变形、弯曲等因素的影响,从而导致仿真分析与实际根系拉拔有较大的误差。文献[9-10]分别建立

了秸秆物料的离散元模型,并结合土壤模型建立了根土复合体,但其进行秸秆建模时采用的颗粒是最小颗粒单元,无法进行切割分离。由此可见,相关研究建立的根土复合体模型多为不可变形的刚性体,对于可准确模拟根土复合体特性的柔性体模型研究近乎空白。

本文以菠菜根的铲切过程为研究主体,首先基于离散元法建立菠菜根根土复合体模型,其中土壤为离散元颗粒,根系模型则由离散元颗粒采用合适的接触力学模型粘结而成,粘结后的根系模型具有一定的柔性特征,可以实现根系的弯曲、断裂。之后通过受力分析、仿真模拟等方法,对收获过程中菠菜根、土壤与根切铲之间的相互关系进行研究,最终对根切铲的各项参数进行优化,确定最优设计,以提高菠菜采收率并降低损伤。

1 菠菜收获机根切铲结构与关键参数计算

1.1 根切铲结构与工作原理

菠菜收获机主要由铲切装置、夹持输送装置和行走装置等部分组成,如图 1 所示。铲切装置对菠菜根土复合体进行剪切,铲断根部并松动土壤,其主要包括根切铲和调节机构;夹持输送装置对断根后的菠菜进行柔顺夹持,并有序拔取输送;行走装置通过外界牵引力驱动收获机在地面前行。

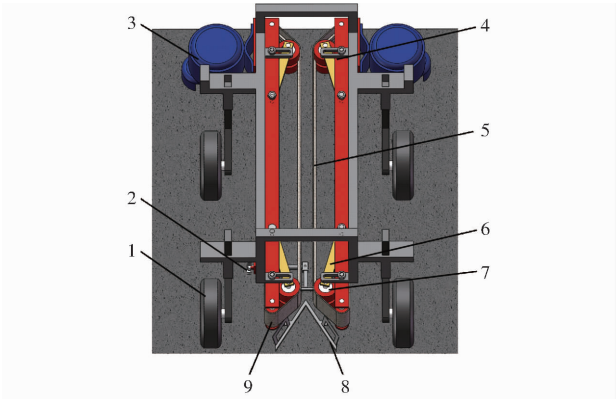


图 1 菠菜收获机整机结构示意图

Fig. 1 Schematic of spinach harvester

1. 车轮 2. 根切铲调节机构 3. 调速电机 4. 机架 5. 夹持带
6. 浮动机构 7. 夹持轮 8. 根切铲 9. 张紧轮

虽然菠菜属于浅根系作物,但经过前期拉拔实验,发现无法仅靠夹持拔取实现菠菜的整株低损收获,需要根切铲铲断菠菜根并松动周围土壤,以此改变根土复合体的物理特性,降低菠菜的抗拉拔性能,继而实现菠菜的夹持拔取。由此可见,根切铲的设

计是菠菜收获机设计的一个关键环节。本文设计主要针对条播种植的菠菜,播种不均匀会出现一行多株的状况,菠菜茎叶部位可以用扶禾装置进行聚拢,而土壤下的根系仅能通过根切铲进行聚拢。基于此设计了一种根切铲,如图 2 所示,图中 δ 为铲翼角, L_b 为铲刀长度, L_s 为铲翼长度, a 为铲槽长度, b 为铲槽宽度。使其兼顾铲根和一定的聚拢作用,并且可以松动土壤减少铲切阻力。

蔬菜收获时,扶禾装置可实现对菠菜上部茎叶部分的聚拢作用;根切铲的铲翼会挤压土壤从而使菠菜根系跟随土壤沿着铲刀滑移切割,产生聚拢作用,继而由夹持输送装置实现菠菜的原位收获,增大菠菜收获范围。夹持输送装置工作时会和地面呈一定角度,若铲切时土壤起垄过高以至接触夹持输送装置,会影响工作进程与采收效率,故在铲翼上开有铲槽,起到一定的卸土作用,降低土壤起垄程度,并且可以减小铲切阻力。

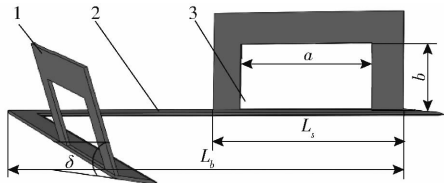


图 2 根切铲结构设计示意图

Fig.2 Structural design schematic of root-cutting shovel

1. 铲翼 2. 铲刀 3. 铲槽

1.2 铲刀关键参数计算

1.2.1 铲刀滑切角

铲刀采用 V 形设计,可以对根系和土壤产生滑切效应,从而减少根系缠绕并降低阻力。选取铲刀刃口线上任意一点,该点在刃口线上的法线与该点运动速度方向之间的夹角为滑切角。考虑到滑切角与滑切效应的关系,若滑切角过小则滑切效应不明显,无法产生有益效果;而滑切角过大会引起铲刀整体尺寸过大并由此引发强度不足和干涉等诸多问题,因此滑切角成为铲刀设计关键^[11-12]。

基于以上问题,需要对滑切角及其产生的滑切作用进行计算分析。建立铲刀相对于根土复合体的剪切运动动力学模型,分析求解产生滑切的临界条件。设置 XY 二维平面坐标系,以根切铲的前进方向作为 Y 轴正方向,以铲刀切割菠菜根的方向作为 X 轴正方向。滑切的研究对象为菠菜根土复合体所在位置的滑切质点 P,其与铲刀刃口的相对位置如图 3 所示。

当根切铲刀工作前行时,滑切质点 P 的相对运动为复合运动,其由铲刀对质点 P 产生的沿前进方向 Y 轴的牵连运动和沿铲刀刃口向下的切割运动

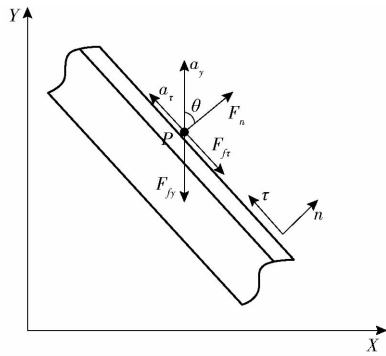


图 3 铲刀滑切受力分析图

Fig.3 Stress analysis diagram of blade sliding cutting

复合而成,此运动中,点 P 将受到铲刀刃口的法向力、根土复合体摩擦力、铲刀摩擦力。建立滑切质点 P 动力学平衡方程为

$$\begin{cases} F_n - F_{fy} \cos \theta = m a_y \cos \theta \\ F_{fy} \sin \theta - F_{fr} = m (a_\tau - a_y \sin \theta) \end{cases} \quad (1)$$

式中 F_n ——铲刀刃口法向力, N

F_{fy} ——根土复合体对滑切质点 P 沿 Y 轴摩擦力, N

θ ——滑切角, (°)

m ——滑切质点 P 质量, kg

a_y ——沿 Y 轴方向牵连加速度, m/s^2

F_{fr} ——滑切质点沿铲刀刃口切线方向的摩擦力, N

a_τ ——滑切质点沿铲刀刃口切线方向加速度, m/s^2

滑切质点 P 在铲刀刃口的切割作用下有沿 Y 轴正方向前进的运动趋势,而根土复合体则对其有沿 Y 轴负方向的摩擦力,如果铲刀和滑切质点之间存在相对滑动,则两者之间必有相对运动趋势,故 P 点沿铲刀刃口切向的摩擦力 F_{fr} 为

$$F_{fr} = F_n f = F_n \tan \varphi \quad (2)$$

式中 f ——滑切质点与铲刀刃口的复合摩擦因数

φ ——滑切质点与铲刀刃口的摩擦角, (°)

将式(2)代入式(1)化简可得

$$F_n (\tan \theta - \tan \varphi) = m a_\tau \quad (3)$$

根切铲在正常工作状态下法向力 $F_n > 0$,为使铲刀和滑切质点之间产生相对滑动,滑切质点切向加速度必然大于零,即 $a_\tau > 0$,由式(3)可得 $\theta > \varphi$,即滑切角大于铲刀和滑切质点间的摩擦角。该摩擦角可能是铲刀和土壤的摩擦角,也可能是铲刀与根系的摩擦角,亦可能为两者之间的复合摩擦角,而其摩擦因数一般不超过 0.8,对应的摩擦角约为 39°,因此,铲刀的设计滑切角需大于该摩擦角。除此之外,V 形铲刀的夹角需要大于拔取输送装置间张角 45°,可得滑切角小于 67.5°。综合滑切角与滑切效

应的关系,设计滑切角 $\theta = 60^\circ$ 。

1.2.2 铲刀刃口角

为减小切削阻力,提高工作效率,需对铲刀进行倒角开刃处理。铲刀刃口角是影响铲刀性能的重要因素,如果铲刀刃口角过大,那么切削阻力会增加,降低工作效率,而铲刀刃口角过小会导致刃口磨损加剧,影响工作性能。

为得出铲刀刃口角的最优值,对铲刀所受阻力进行分析,铲刀剪切时所受阻力如图 4 所示。由图可知,铲刀的剪切力需要克服来自土壤的抵抗机械破坏的粘结力、基于土壤紧实度的抗压力、土壤对铲刀的摩擦力和粘附力以及菠菜根的剪切阻力。

$$F_z = 2F_{N1} \sin \frac{\delta}{2} + \left(2F_{T1} \cos \frac{\delta}{2} + 2F_{T2} \right) + \left(2F_{C1} \cos \frac{\delta}{2} + 2F_{C2} \right) + F_j + c \quad (4)$$

- 其中
- $F_{T1} = \mu F_{N1}$ $F_{T2} = \mu F_{N2}$ $F_N = P_i A_i$
- 式中 F_z ——铲刀剪切力, N
- A_i ——土壤与铲刀接触面积, m^2
- δ ——铲刀刃口角, $(^\circ)$
- F_{N1} 、 F_{N2} ——铲刀所受土壤法向力, N
- F_{T1} 、 F_{T2} ——铲刀所受土壤摩擦力, N
- F_{C1} 、 F_{C2} ——刀片所受土壤粘附力, N
- μ ——土壤与铲刀间摩擦因数
- P_i ——铲刀单位面积上所受压力, Pa
- c ——土壤粘结力, 等于土壤内聚力, N
- F_j ——菠菜根剪切阻力, N

可得

$$F_z = 2 \left(F_{T1} + F_{T2} + F_{C2} \cos \frac{\delta}{2} \right) + P_i A_i + \mu P_i A_i \cot \frac{\delta}{2} + F_j + c \quad (5)$$

为求得入土阻力最小时的刃口角 δ , 对式(5)二次求导可得

$$\delta = 2 \arcsin \sqrt{\frac{3 \mu P_i A_i}{F_{C2}}} \quad (6)$$

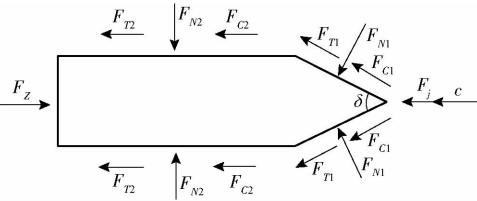


图 4 铲刀剪切受力

Fig. 4 Shearing force of blade

滑动摩擦因数和土壤粘附力分别为 0.170 ± 0.0146 和 $(2.6 \pm 1.238) \text{ N}^{[13]}$, 通过计算得出铲刀刃口角范围为 $36.8^\circ \sim 53.15^\circ$, 参照文献[14]可知,

较优的刃口角范围为 $40^\circ \sim 45^\circ$, 故最终选择刃口角为 45° , 此角度可以保证铲切时铲刀所受土壤与菠菜根系复合阻力为最小。

2 根土复合体离散元模型建立

2.1 菠菜根离散元模型建立

2.1.1 菠菜根生物力学特性测定

为提高试验可靠性,采用随机取样方法对菠菜根进行取样,取样地点为山东农业大学南校区 6 号大棚,取样时间为 2019 年 6 月上旬。取样侧根较少、长势基本一致的菠菜。菠菜根的物理特性试验借助 WDW-5E 型微机控制电子式万能试验机、数显式游标卡尺等设备进行。

基于 ASABE 2006 干燥法标准,测得菠菜根含水率最大值为 92%, 最小值为 84%, 标准差为 2.6%。各取 10 株菠菜根进行剪切、压缩试验。由于菠菜根各部分直径不同,剪切力学特性不同,需对直径 6、7、8 mm 的不同部位进行剪切试验,试验结束后进行数据统计,得到菠菜根的峰值剪切力。对于压缩试验,由于菠菜根形状不规则,须对其进行预处理。菠菜根为横观各向同性材料^[15], 在轴向上为各向同性,故截取轴向长度 20 mm、两端直径为 $(8.6 \pm 0.1) \text{ mm}$ 的部分,将其等视为规则圆柱体,进行轴向压缩试验,从而获得菠菜根的峰值压缩力。菠菜根的剪切与压缩试验遵循国标 GB/T 1939—2009 和 GB/T 1937—1991 进行,设置加载速率为 2 mm/min , 每秒采集 2 个数据点,得到载荷-位移曲线如图 5 所示。

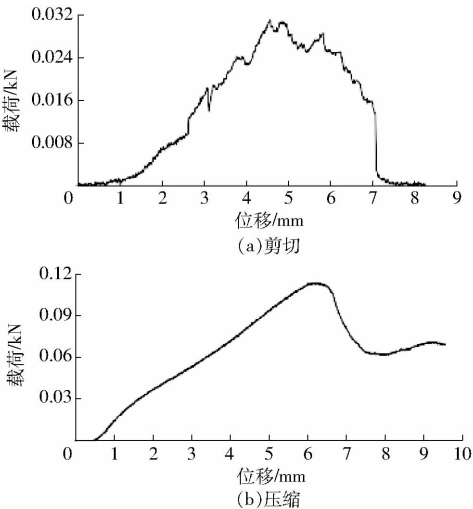


图 5 载荷-位移曲线

Fig. 5 Load - displacement curves

试验结束后进行数据统计,得到直径 8 mm 处剪切力最大为 31.2 N; 菠菜根的峰值压缩力为 113.8 N。此结果可以为菠菜根离散元建模提供数

据支持。

2.1.2 离散元接触模型选择及参数计算

为提高仿真的准确性,保证仿真效率,本文将土壤及根系颗粒简化,建立三维球体模型。在离散元仿真中,接触力学模型直接影响了颗粒之间的接触力与力矩,对颗粒粘结碰撞及仿真结果有着较为显著的影响。基于根系粘结的复杂性并结合实际仿真情况,本文选用 Hertz - Mindlin(no slip)模型作为离散元仿真的接触力学模型。

研究表明^[16-17] Hertz - Mindlin With Bonding (HWB)模型可以使两两颗粒间形成 Bond 键提供相应的粘结力,生成的颗粒组将有一定的柔性特征。该模型的主要影响参数为法向刚度系数、切向刚度系数、临界法向应力、临界切向应力以及粘结半径。

通过 HWB 模型理论^[18],法向刚度 K_n 和切向刚度 K_s 计算式为

$$K_n = \frac{4}{3} \left(\frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_j^2}{E_j} \right)^{-1} \left(\frac{r_i + r_j}{r_i r_j} \right)^{-\frac{1}{2}} \tag{7}$$

$$K_s = \left(\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3} \right) K_n \tag{8}$$

式中 ν_i, ν_j ——颗粒 i, j 泊松比
 E_i, E_j ——颗粒 i, j 弹性模量
 r_i, r_j ——颗粒 i, j 半径, mm

菠菜根建模中各颗粒材质相同,故颗粒 i, j 的各参数值也相同。故取所有颗粒的平均粒径作为颗粒半径计算值,可在软件后处理模块中导出为 0.391 mm;菠菜根泊松比取值为 0.3。弹性模量 E 可通过计算得出,计算公式为

$$E = \frac{F}{A\varepsilon} \tag{9}$$

其中 $A = \pi R^2$

式中 F ——压力, N
 A ——压缩面积, m^2
 R ——压缩面半径, m
 ε ——应变

由图 5 压缩曲线可知, $F = 113.8\text{ N}$, $R = 4.3 \times 10^{-3}\text{ m}$, $\varepsilon = 6.1 \times 10^{-3}$, 可求得弹性模量 $E = 319\text{ MPa}$ 。通过以上参数数值可求得法向刚度 $K_n = 5.2 \times 10^6\text{ N/m}$;切向刚度 $K_s = 3 \times 10^6\text{ N/m}$ 。

根据摩尔剪切理论,临界法向应力 σ 与临界切向应力 τ_0 的计算公式为

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{10}$$

$$\tau_0 = c_r + \sigma \tan \varphi_r \tag{11}$$

式中 A ——根系横截面积, m^2
 c_r ——根系内聚力, MPa

φ_r ——内摩擦角

结合 2.1.1 节中的试验结果,可求得临界法向应力 $\sigma = 1.95\text{ MPa}$ 。本文内摩擦角取值为 40° ,内聚力取值 2.3 MPa 。可求得临界切向应力 $\tau_0 = 3.94\text{ MPa}$ 。粘结半径 R_b 通常取颗粒半径的 1.2 ~ 2 倍,结合实际仿真情况,本文取值为 0.8 mm。结合峰值剪切力对求得参数进行微调,最终获得菠菜根颗粒 HWB 粘结参数如表 1 所示。

表 1 HWB 粘结参数

Tab.1 Bonding parameters of HWB

参数	数值
法向刚度/(N·m ⁻¹)	5.7 × 10 ⁶
切向刚度/(N·m ⁻¹)	3.6 × 10 ⁶
临界法向应力/MPa	1.95
临界切向应力/MPa	4.2
粘结半径/mm	0.8

2.1.3 离散元模型建立及参数标定

菠菜根呈不规则圆锥体。经统计,其中上端直径为 $(10 \pm 1)\text{ mm}$ 、下端直径 $(4 \pm 1)\text{ mm}$ 的根系占到总量的 80% 以上,且侧根和根须较少,故将其等同为上端直径 10 mm,下端直径 4 mm,长度为 60 mm 的圆台。

根系在物理结构上较为复杂,很难按实际结构进行建模。查阅相关资料^[19-21]可知,通常将各向异性的研究对象等效为各向同性进行研究。所以,本次研究中将菠菜根系视为各向同性结构,使用快速填充的方法对菠菜根进行离散元建模。填充颗粒数为 5 330 个,建立菠菜根离散元模型如图 6 所示。

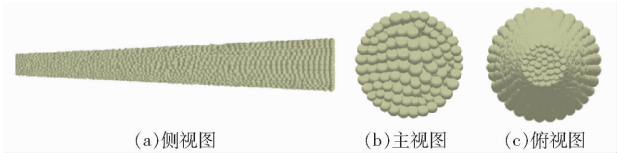


图 6 菠菜根离散元模型

Fig.6 Discrete element models of spinach root

利用表 1 的粘结参数对模型进行粘结,对菠菜根模型进行三点弯曲试验,如图 7 所示。可以看出模型有较好的柔性特征,且直径较小的一端弯曲性能更好,这与实际菠菜根柔性特征相同。

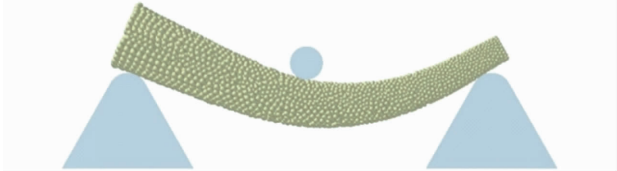


图 7 三点弯曲试验

Fig.7 Three-point bending test

为验证离散元方法建立菠菜根模型的可行性,

需要对菠菜根离散元模型进行验证,确定其是否有与实际根部一致的力学特征与物理性质。建立与物理试验同尺寸的试验台,导入离散元软件进行虚拟试验,并采用与物理试验相同的加载速度,虚拟试验台如图 8 所示。为保证运算结果可靠,将网格尺寸设置两倍于粒径,仿真时间步长为 1×10^{-5} s。仿真结束后进行数据的处理与分析。

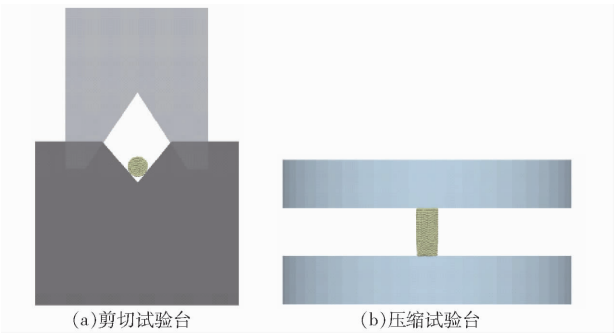


图 8 虚拟试验台
Fig. 8 Virtual test bench

由软件后处理模块导出菠菜根剪切受力,生成载荷-位移曲线如图 9 所示。与物理剪切试验曲线(图 5a)进行对比分析可知两者趋势基本一致:开始时剪切力随着剪切量的增加而增大,当剪切力达到极限值后,曲线开始下降,后有小幅度上升,随后试样被剪断,载荷下降。物理剪切试验峰值剪切力为 31.3 N,仿真剪切试验峰值剪切力为 28.8 N,相对误差为 8.6%。

压缩仿真结束后,在后处理模块使用不同颜色对 Bond 键进行染色,颜色越深表示受力越大,其中红色表示已经断裂的 Bond 键,仿真结果如图 10a 所示。

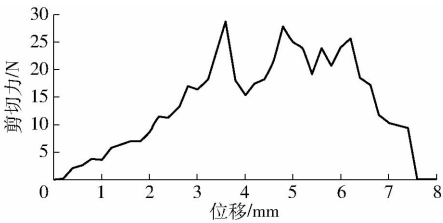


图 9 虚拟剪切试验曲线
Fig. 9 Virtual shearing test curve

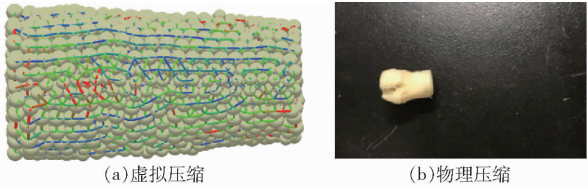


图 10 物理与虚拟压缩试验对比
Fig. 10 Compression experiments

示。由仿真结果可以看出,菠菜根靠近上压板的一端发生明显的扩张,直径增大,且出现一条不规则的 Bond 键断裂痕迹,这与实际物理试验结果(图 10b)相一致。

2.2 土壤模型建立

2.2.1 土壤粒径确定

土壤粒径会影响到仿真计算速度及仿真真实性,因此仿真中应建立与实际粒径接近的土壤颗粒。土壤粒径由圆孔筛法测定,土壤筛为 2 类 7 层,由上到下依次为圆孔粗筛(孔径为 3.00、2.00 mm)、圆孔细筛(孔径为 1.00、0.45、0.30、0.20、0.10、0.05 mm),其中 3 mm 的土壤筛不纳入统计范围。在不同测试点取样 3 次,每次取土质量为 400 g,分别记为土样 1、2、3。对样品土壤进行筛分,并记录数据。得到土壤的粒径分布如表 2 所示。

表 2 实验区土壤粒径分布

参数		粒径/mm						
		≤0.05	0.05~0.10	0.10~0.20	0.20~0.30	0.30~0.45	0.45~1.00	1.00~2.00
质量/g	土样 1	31.15	15.20	57.28	36.63	105.25	108.76	56.74
	土样 2	50.75	15.30	50.47	30.65	82.25	130.95	52.70
	土样 3	47.10	12.70	32.65	37.24	69.30	90.29	34.56
平均值/g		43.00	14.40	46.80	34.84	85.60	110.00	48.00
百分比/%		10.75	3.60	11.70	8.71	21.40	27.50	12.00

由表 2 可知,土壤粒径集中在 0.30~2.00 mm 内的颗粒占比超过 50%,结合计算机性能与仿真实际情况,设置仿真土壤粒径为 1.00 mm,0.3~2 倍随机分布,这样可以大致覆盖实际的土壤粒径范围。

2.2.2 土壤紧实度测量

土壤紧实度作为土壤基本的物理特性,是确定仿真土壤参数的重要参考。由于菠菜根深度较浅,本文仅对 150 mm 以上的表层土壤进行测量。表层土壤属于轻壤土,通常紧实度较小^[22]。在菠菜试验

地选取 3 个不同的测试点,利用土壤坚实度仪测得并记录不同深度的土壤紧实度如表 3 所示。

2.2.3 土壤模型标定

首先根据文献[17]确定土壤粘结参数的初始值,并建立土壤和紧实度仪锥型压头模型进行仿真,如图 11 所示。仿真结束后导出压头所受压力并与实际土壤紧实度进行对比,在初始值基础上进行微调,直到仿真土壤满足条件为止。已有的研究表明,在 HWB 粘结模型下粘结刚度系数对颗粒行

表 3 土壤紧实度
Tab.3 Soil compaction kPa

测试点	试验深度/mm		
	50	100	150
1	7	32	59
2	8	48	64
3	6	44	58
均值	7	41.3	60.3

为的影响较小^[23],并且菜地土壤含水率较高,相对于大田来说紧实度较低,因而可降低临界应力进行参数调节。反复对参数进行微调组合,得到最优参数如表 4 所示。不同深度实际土壤与仿真土壤紧实度对比如表 5 所示。

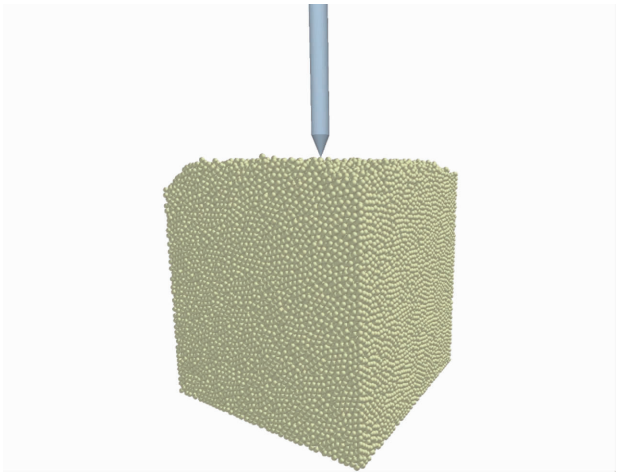


图 11 土壤紧实度测量仿真模型

Fig. 11 Simulation model of soil compaction test

表 4 HWB 模型接触参数标定值
Tab.4 Parameters of HWB model

参数	数值
法向刚度/(N·m ⁻¹)	2 400 000
切向刚度/(N·m ⁻¹)	1 700 000
法向临界应力/Pa	175 000
切向临界应力/Pa	116 000
粘结半径/mm	1.8

表 5 土壤紧实度对比
Tab.5 Soil compaction kPa

类别	试验深度/mm		
	50	100	150
实际土壤	7.0	41.3	60.3
仿真土壤	8.2	49.5	65.9
相对误差/%	17.1	19.9	9.3

由表 5 可知,实际土壤与仿真土壤的相对误差小于 20%。由此可判定,利用此粘结参数粘结后的土壤模型可用于表征实际土壤。

2.3 菠菜根土复合体模型建立

2.3.1 根土复合体离散元建模

建立基于离散元的根土复合体模型分为 2 步:

首先使用快速填充的方法建立根系模型;之后建立长、宽、高都为 60 mm 的开盖六面体土槽,采用设置颗粒工厂下落土壤颗粒方法建立土壤模型,颗粒生成时间为 5 s。土壤颗粒落完后经 1 s 沉积,选用 HWB 接触力学模型作为土壤颗粒间及根、土之间的粘结模型,在 6 s 时采用标定好的粘结参数进行颗粒粘结,根土复合体建模如图 12 所示。

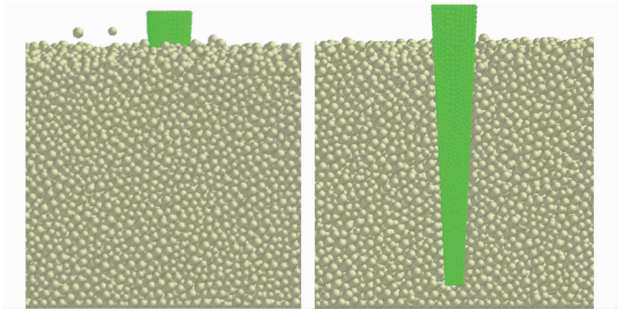


图 12 根土复合体模型

Fig. 12 Root-soil complex model

2.3.2 根土复合体剪切试验及参数标定

参照文献[24-25]的试验方法,对实际根土复合体进行剪切试验,从而获得根土复合体的峰值剪切力。之后参照相同参数及试验条件进行根土复合体剪切仿真,得到峰值剪切力的仿真数值,与物理试验数值进行比较分析,对根土复合体的粘结参数进行微调,从而确定根土模型间的仿真参数。

根据相关文献的试验方法,利用万能试验机进行根土复合体剪切试验,试验首先要获得与仿真模型同尺寸的原状根土复合体。选择粗壮、生长状况良好的菠菜,以菠菜根为中心,借助刀片、铁锹等工具切割并挖出 60 mm×60 mm×60 mm 的立方体,将其茎叶去除,等视为根土复合体,如图 13 所示,取样本数为 3 个。

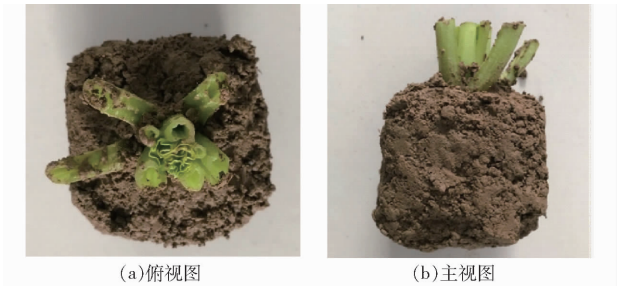


图 13 菠菜根土复合体

Fig. 13 Root-soil complex of spinach

在前期铲切仿真与试验中发现,当根切铲入土深度较浅时,由于地面起伏,铲刀会切到部分菠菜的茎部造成菠菜损伤;而入土深度较深,则会受到较大的铲切阻力,且堆土严重。结合仿真与试验结果,为了达到带根收获的农艺要求,最终确定入土(铲切)深度为 20 mm。故选取根土复合体 20 mm 处进行剪

切试验,剪切速度为 10 mm/min,每秒保存 1 个数据点。试验结束后对数据进行后处理,试验结果取平均值生成剪切受力曲线并得到峰值剪切力为 28 N。

基于菠菜根的峰值剪切力进行模型参数标定。为了减少标定参数的个数,参照文献[26]的方法,可以取 $K_n = K_s, \sigma = \tau_0$ 。前期仿真结果表明颗粒粘结半径对仿真的影响不明显,且颗粒粘结刚度系数及颗粒临界应力的有效取值范围分别是 6 ~ 12 MN/m³ 和 2 ~ 8 MPa。在颗粒粘结刚度系数及临界应力的有效取值范围采用最陡爬坡试验的设计方案进行剪切仿真,逐渐缩小参数取值范围,剪切仿真的速度等条件与物理试验保持一致。最终确定当粘结刚度为 8 MN/m、临界应力为 4 MPa、粘结半径为 1 mm 时,根土复合体模型的峰值剪切力为 32 N,与物理试验误差为 14.2%,证明此组参数可以用于根土复合体模型粘结。

将根土间颗粒粘结参数设定为标定后的数值进行仿真,得到剪切仿真受力曲线,与物理剪切试验受力曲线进行对比,如图 14 所示。由图 14 可知,剪切仿真受力曲线与剪切试验受力曲线基本重合,进一步说明通过标定数值粘结的离散元根土复合体模型可以较为准确地反映实际田间根土复合体的特性。

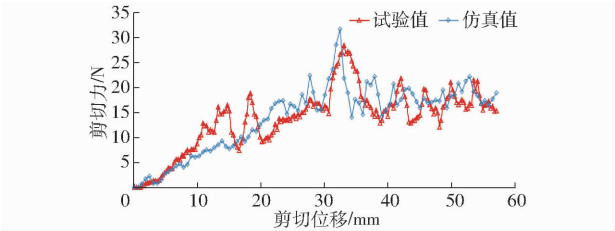


图 14 物理与仿真剪切试验对比

Fig. 14 Comparison of physical and simulated shearing tests

3 根切铲离散元仿真及多目标参数优化

3.1 根切铲仿真及工作机理分析

3.1.1 仿真模型建立

本文主要研究根切铲对边缘菠菜根的聚拢作用,故将根切铲的铲切位置定于紧贴根部边缘,根系模型与铲刃相切。建立长 × 宽 × 高为 500 mm × 200 mm × 70 mm 的土槽,落满颗粒后根据 2.3.2 节标定结果进行颗粒粘结,形成根土复合体模型。

在初始仿真中发现,由于根切铲为对称结构,根切铲两侧土壤扰动基本一致,且土壤内部不与铲翼接触区域的土壤基本无扰动,证明根切铲对称两侧互不影响,故仅对根切铲一半的结构进行仿真以提高仿真效率。处理时将土槽宽度缩小 50%,土槽右侧边界处于原位置,设置锐利时间步为 20%,仿真开始后,土槽右侧一半的土壤颗粒将消失,如图 15

所示。之后由后处理模块将仿真保存为 0 s 开始,每 0.01 s 保存一个数据点,仿真结束后进行后处理。

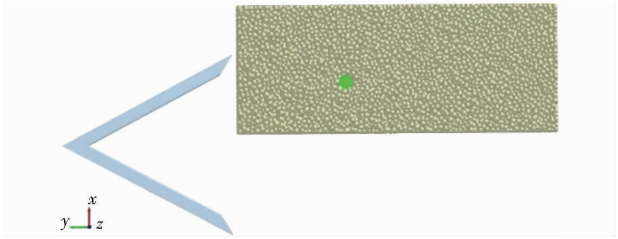


图 15 铲切仿真模型

Fig. 15 Cutting simulation model

3.1.2 根切铲工作原理仿真分析

对根切铲工作过程进行仿真分析可以探究根切铲的工作原理,明晰根、土和铲三者之间的相互作用关系。对根切铲进行铲切仿真,设置入土深度为 20 mm,铲切速度为 0.25 m/s。仿真结束后,对仿真土壤进行切片处理,并基于颗粒运动速度对颗粒进行染色,颜色变化颗粒数量表示扰动范围,颜色深度变化可以表示速度大小从而反映受力情况。为更好地观察铲切过程中根系的微观变化,在后处理模块中单独显示菠菜根并进行着色,仿真过程中土壤和根系的变化如图 16、17 所示。

由图 16、17 可知,根切铲对下部土壤的扰动较小,土壤颗粒颜色基本无变化,扰动颗粒多聚集在剪切机构周围,随着前进距离的增加,根切铲受力逐渐增大。根切铲未进入土壤时(图 16a、17a),离散元颗粒无变化。当根切铲入土 90 mm 时(图 16b、17b),开始剪切根系,根切铲周围土壤受扰动较大,部分土壤颜色变红,速度超过 0.25 m/s;此时土壤已产生堆积起垄,但起垄程度较小。菠菜根受到土壤的挤压作用发生弯曲,在弯曲应力集中的部位颗粒变红,受力最大。

当根切铲入土 180 mm 时(图 16c、17c),根切铲已全部进入土壤,根切铲周围颗粒受力都有不同程度的增加,这是由于部分颗粒沿根切铲向两侧运动,挤压两侧土壤颗粒所致,由于土壤的回落和挤压,紧贴铲面及上侧的土壤已经全部变红,速度超过 0.25 m/s;铲翼左侧堆积土壤较多,土壤起垄较为明显。此时菠菜根已经被剪断,菠菜根在土壤摩擦力及铲翼阻力的作用下随根切铲移动产生聚拢滑移,菠菜根被剪断部分速度较大,留在土壤中部分已无运动趋势。由此可知,此根切铲有较好的剪切性能并且可以对菠菜根产生聚拢。

为研究铲槽的工作效果与机理,截取根切铲入土 180 mm 时的主视图进行分析,图 18 是同一维度下根切铲工作状况的不同显示模式。图 18a 为默认的颗粒模式,可知在图中标识线下方、铲翼右侧出现

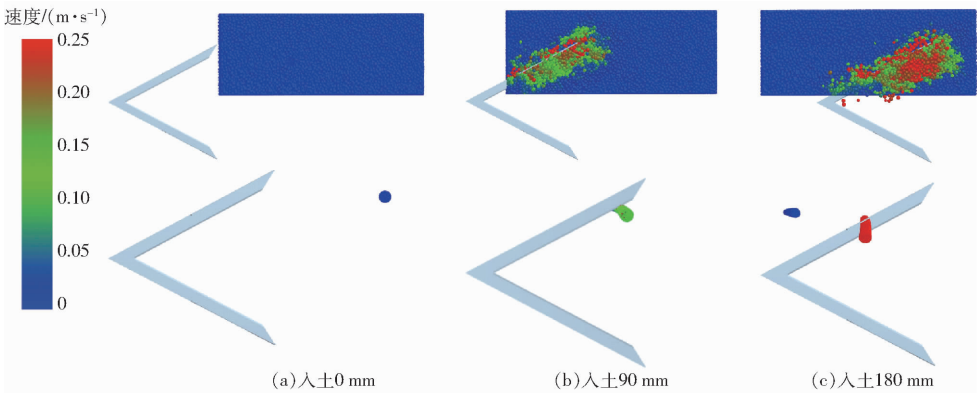


图 16 铲切仿真过程俯视图
Fig. 16 Top views of cutting simulation process

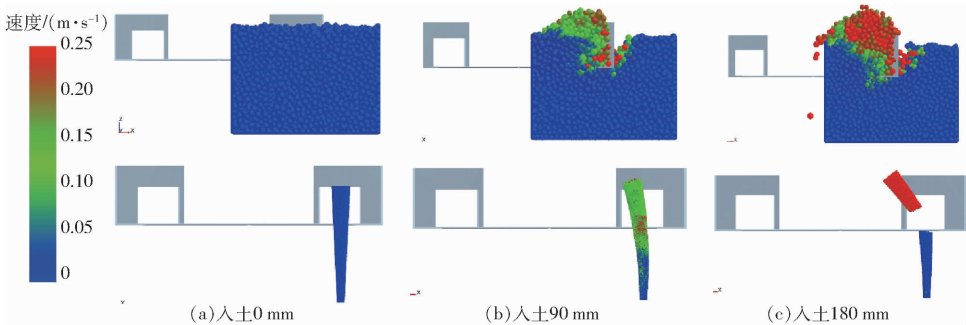


图 17 铲切仿真过程主视图
Fig. 17 Main views of cutting simulation process

一块无颗粒的空白,黑线下方土壤起伏几乎持平,说明颗粒在铲槽内有良好的通过性,且铲翼上方无槽的部位对土壤进行了推移。

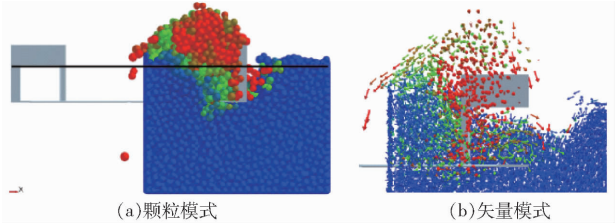


图 18 入土 180 mm 主视图
Fig. 18 Main views of 180 mm penetration

图 18b 为矢量模式,可以显示颗粒的运动速度矢量方向。由图可知,铲槽左侧土壤有向铲翼平面垂直的运动趋势,说明土壤可在铲槽中通过。铲槽上方土壤有向左上方的运动趋势,产生土壤堆积。红色土壤颗粒多聚集在铲翼上侧,铲槽位置的土壤受力较小,证明铲翼开槽可以减小根切时的土壤阻力,降低根切铲磨损。

3.2 根切铲结构参数多目标优化

3.2.1 仿真设计及数据统计

本次设计以根系聚拢程度与土壤起垄程度为评价指标,得到根切铲最优设计使根系有最大程度的聚拢,并且使土壤起垄程度降到最低。根切铲的铲翼角、铲翼面积及铲槽面积是影响仿真结果的重要

因素,其中铲翼角为铲翼与铲刀表面的夹角,铲翼长度以铲翼长度在铲刀长度的占比为衡量标准,铲槽面积以铲槽在铲翼上的面积占比为衡量标准,铲翼宽度为固定值 35 mm。

为了研究各参数之间的交互作用,本文运用响应面软件进行三因素响应面仿真设计,依据 Box - Behnken 中心组合设计理论^[27],通过铲切仿真,分析根切铲结构参数对土壤起垄和根系聚拢的影响,继而优化目标参数。在前期仿真中确定铲翼角(X_1)、铲翼长度占比(X_2)和铲槽面积占比(X_3)的取值范围分别为 $70^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 、 $40\% \sim 60\%$ 和 $40\% \sim 60\%$ 。每个参数分别建立低(-1)、中(0)、高(1)3 个水平,因素水平如表 6 所示。

表 6 因素水平
Tab.6 Factors and levels

水平	铲翼角 $X_1 / (^{\circ})$	铲翼长度占比 $X_2 / \%$	铲槽面积占比 $X_3 / \%$
低(-1)	70	40	40
中(0)	80	50	50
高(1)	90	60	60

土壤起垄高度以每个土壤颗粒起垄的平均高度为基准,即统计土壤颗粒在 Z 轴方向的平均位移;同理,根切铲对根系的聚拢程度则需要统计根系颗粒在 X 轴方向的平均位移。颗粒位移的统计方法

为:首先通过离散元软件后处理模块导出土壤及根系每个颗粒的 ID 和其对应 0 s 和 1 s 时在 X 轴、 Z 轴 2 个方向的坐标;然后利用 Matlab 软件进行数据点的统计计算,得出颗粒在 X 轴、 Z 轴方向位移的平均值。

由响应面软件中 Box - Behnken 试验原理设计三因素三水平仿真试验^[28-30]。仿真设计方案包括 17 个试验点,其中分为 12 个分析因子和 5 个零点估计误差,仿真设计及响应值见表 7。

表 7 仿真设计及响应值
Tab.7 Simulation design and response value

编号	铲翼角	铲翼长度 占比	铲槽面积 占比	土壤起垄 值/m	根系聚拢 值/m
1	-1	0	1	0.011 1	-0.004 2
2	0	-1	1	0.007 1	-0.004 3
3	0	-1	-1	0.010 5	-0.005 0
4	-1	-1	0	0.009 1	-0.004 6
5	1	0	-1	0.019 7	-0.010 2
6	0	1	-1	0.011 9	-0.018 8
7	0	0	0	0.011 2	-0.007 0
8	0	0	0	0.010 0	-0.005 3
9	0	1	1	0.010 1	-0.005 6
10	0	0	0	0.011 0	-0.006 0
11	1	-1	0	0.011 9	-0.004 2
12	1	1	0	0.014 9	-0.009 3
13	0	0	0	0.011 7	-0.007 2
14	-1	1	0	0.010 4	-0.011 5
15	1	0	1	0.015 4	-0.004 8
16	0	0	0	0.010 0	-0.004 0
17	-1	0	-1	0.013 5	-0.007 2

表 8 方差分析
Tab.8 Variance analysis

方差来源	自由度	土壤起垄值				根系聚拢值			
		平方和	均方和	F	P	平方和	均方和	F	P
模型	9	127. 87	14. 21	25. 38	0. 000 1	210. 85	23. 43	8. 84	0. 003 2
X_1	1	39. 61	39. 61	72. 00	<0. 000 1 **	0. 13	0. 13	0. 052	0. 825 3
X_2	1	9. 46	9. 46	17. 20	0. 004 3 **	91. 80	91. 80	38. 55	0. 000 4 **
X_3	1	17. 70	17. 70	32. 18	0. 000 8 **	62. 16	62. 16	26. 11	0. 001 4 **
X_1X_2	1	0. 72	0. 72	1. 31	0. 289 4	0. 81	0. 81	0. 34	0. 578 0
X_1X_3	1	0. 90	0. 90	1. 64	0. 241 0	1. 44	1. 44	0. 60	0. 462 2
X_2X_3	1	0. 64	0. 64	1. 16	0. 316 5	21. 64	21. 64	3. 89	0. 041 0 *
X_1^2	1	35. 66	35. 66	64. 82	<0. 000 1 **	0. 11	0. 11	0. 047	0. 835 1
X_2^2	1	18. 83	18. 83	34. 24	0. 000 6 **	18. 74	18. 74	4. 19	0. 042 7 *
X_3^2	1	6. 42	6. 42	11. 67	0. 011 2 *	3. 13	3. 13	1. 32	0. 289 1
残差	7	3. 85	0. 55			16. 67	2. 38		
失拟项	3	1. 56	0. 52	0. 91	0. 511 1	9. 79	3. 26	1. 90	0. 271 4
纯误差 r	4	2. 99	0. 57			6. 88	1. 72		
总和	16	131. 72				227. 52			

注: ** 表示 $P < 0. 01$ 影响极显著; * 表示 $P < 0. 05$ 影响显著。

3.2.2 回归模型建立与显著性检验

利用响应面软件进行多元回归拟合分析,求得各项参数的最优组合。基于表 7 中的响应值,构建土壤起垄值 Y_1 、根系聚拢值 Y_2 对铲翼角(X_1)、铲翼长度占比(X_2)和铲槽面积占比(X_3)的二次多项式响应面回归模型

$$Y_1 = 167.22 - 4.41X_1 + 1.68X_2 - 1.20X_3 + 4.25 \times 10^{-3}X_1X_2 - 4.75 \times 10^{-3}X_1X_3 + 4.00 \times 10^{-3}X_2X_3 + 0.03X_1^2 - 0.02X_2^2 + 0.01X_3^2 \quad (12)$$
$$Y_2 = 65.50 - 0.80X_1 - 0.60X_2 - 0.90X_3 + 4.50 \times 10^{-3}X_1X_2 + 6.00 \times 10^{-3}X_1X_3 + 0.03X_2X_3 + 1.63 \times 10^{-3}X_1^2 - 0.02X_2^2 - 8.63 \times 10^{-3}X_3^2 \quad (13)$$

对以上回归方程进行方差分析,分析结果如表 8 所示。由表 8 可得,响应面模型中的土壤起垄值 Y_1 、根系聚拢值 Y_2 模型的 $P < 0.05$ (分别为 $P_{Y_1} = 0.000\ 1$; $P_{Y_2} = 0.003\ 2$),表明此回归模型显著;失拟项 $L > 0.05$ (分别为 $L_{Y_1} = 0.511\ 1$; $L_{Y_2} = 0.271\ 4$),此结果说明所得回归方程拟合程度高;方程的决定系数 R^2 取值分别为 0.970 8、0.936 7,表明这个模型可以用于解释 90% 以上的评价指标。因此,根切铲的结构参数可以用此模型进行优化分析。

P 值表示显著水平,可反映根切铲的各项参数对拟合回归方程的影响。土壤起垄值 Y_1 模型方程中有 5 个回归项的影响极显著 ($P < 0.01$),有 1 个回归项对模型影响显著 ($P < 0.05$);根系聚拢值 Y_2 的模型方程有 2 个回归项的影响极显著 ($P < 0.01$),有 2 个回归项对模型影响显著 ($P < 0.05$)。

引入和剔除变量的检验水准设定为 0.05,剔除

模型不显著回归项,对模型 Y_1 、 Y_2 进行进一步优化^[27]。模型优化为

$$Y_1 = 159.23 - 4.43X_1 + 2.22X_2 - 1.38X_3 + 0.03X_1^2 - 0.02X_2^2 + 0.01X_3^2 \quad (14)$$

$$Y_2 = 32.38 - 0.20X_2 - 1.28X_3 + 0.017X_2X_3 - 0.03X_2^2 \quad (15)$$

根据模型 Y_1 、 Y_2 的 $P < 0.05$ (分别为 $P < 0.000\ 1$ 、

$P = 0.003\ 1$) 显著与模型 Y_1 、 Y_2 的失拟项 $P > 0.05$ (分别为 $0.479\ 7$ 、 $0.105\ 9$) 不显著,可判定优化后的回归模型可靠。

3.2.3 交互因素对性能影响规律分析

响应面可以分析不同因素对响应值的交互影响作用,利用响应面软件并结合回归方程分析结果,得到响应面如图 19 所示。

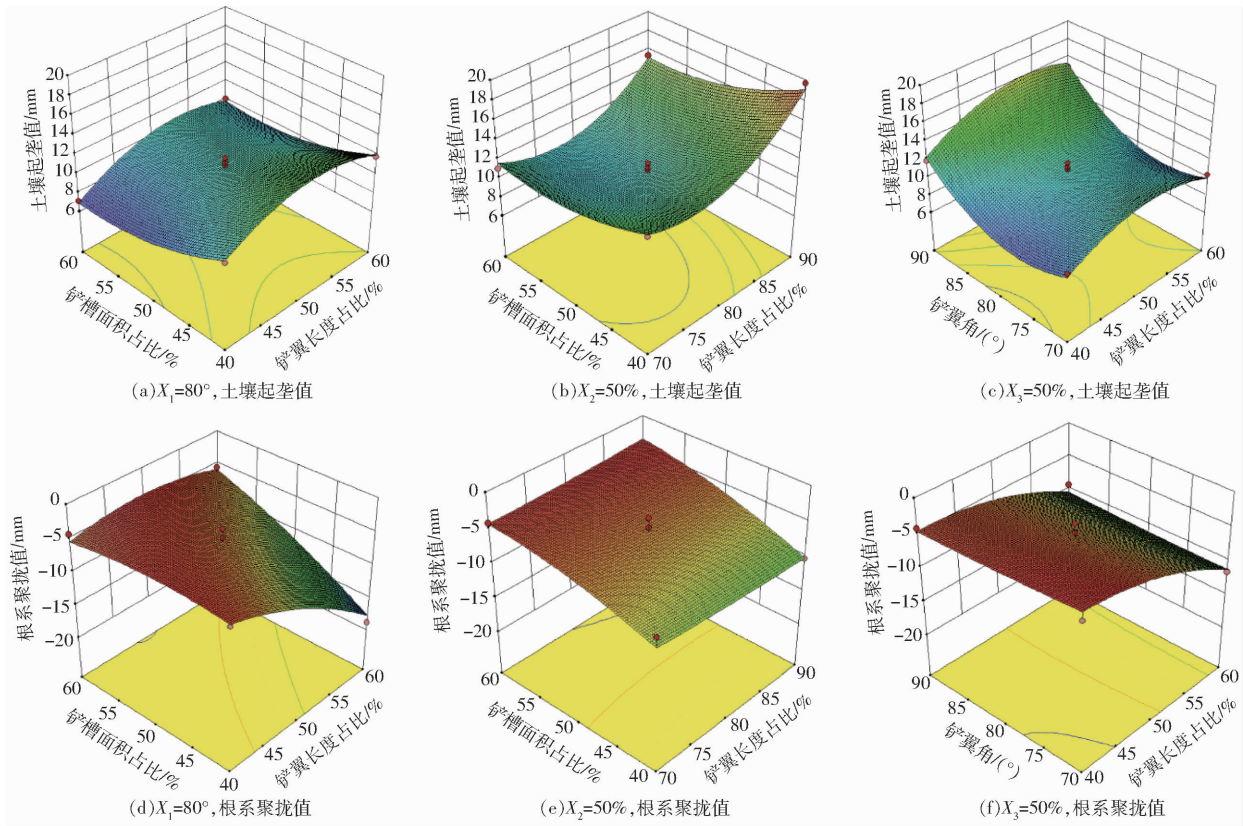


图 19 铲翼角、铲翼长度占比、铲槽面积占比对土壤起垄值和根系聚拢值的影响

Fig. 19 Influence of blade angle, blade length and blade area on soil heave and root gather

由图 19a 可知铲翼角处于中心水平(80°)时,增加铲槽面积并且减小铲翼长度有利于土壤起垄值的降低;由图 19b 可知铲翼长度占比位于中心水平(50%),土壤起垄值的降低可以通过增大铲槽面积和减小铲翼角的方法实现;铲槽面积占比位于中心水平(50%)时,铲翼角、铲翼长度对土壤起垄值交互作用的响应面图像如图 19c 所示,由图可知,通过减小铲翼角和铲翼长度可以实现土壤起垄值的降低。对各交互因素对土壤起垄值的响应面图像进行分析总结,可得各因素对土壤起垄的影响为:当铲翼角越小、铲翼长度越短、铲槽面积越大时,土壤起垄值越低,继而对接夹输送过程造成的影响越小;相反的情况下,土壤起垄值会越高,对菠菜采收造成负面的影响。

造成此趋势的主要原因:当铲翼角减小时,铲翼的垂直高度减小,部分土壤会从铲翼上边缘滑出,从而降低土壤的起垄;当铲翼长度变短时,铲翼间开口增大,有利于土壤的通过;当铲槽面积增大

时,土壤会从铲槽中通过,降低土壤的堆积。

图 19d 为铲翼角处于中心水平(80°)时,交互因素铲槽面积、铲翼长度对根系聚拢值的响应面图,由图可知,随着铲翼长度的增加和铲槽面积的减小,根系聚拢值增加;从图 19e 可以看出,铲翼长度占比位于中心水平(50%),铲翼角对根系聚拢值影响较小,铲槽面积的减小可以增加根系聚拢值;当铲槽面积占比位于中心水平(50%)时,增加铲翼长度有利于根系聚拢,如图 19f 所示。

由交互因素对根系聚拢值响应面图像可知,增加铲翼长度、减小铲槽面积可以增加根系的聚拢值,铲翼角对根系聚拢值的影响较小。由不同响应面曲线随各因素增大方向的变化幅度可以得出,在中心水平下各因素对根系聚拢值的影响显著性由大到小依次为铲翼长度、铲槽面积、铲翼角。

3.2.4 设计参数优化结果

由于各因素对不同响应值的影响趋势及贡献率

各不相同,因此,为了得到最佳的参数组合,需要利用响应面软件进行多目标优化。其目标函数为

$$\begin{cases} 70^{\circ} \leq X_1 \leq 90^{\circ} \\ 40\% \leq X_2 \leq 60\% \\ 40\% \leq X_3 \leq 60\% \\ -20\text{ mm} < Y_j < 20\text{ mm} \quad (j=1,2) \end{cases} \quad (16)$$

式中 X_i ——待优化参数
 Y_j ——响应值

利用响应面软件对各参数的优化结果为:铲翼角为 76° 、铲翼长度占比为 57% 、铲槽面积占比为 40% 。此时土壤起垄值最低为 12.24 mm 、根系聚拢值最高为 17.55 mm 。

4 采收试验

4.1 试验条件与方案

根据仿真结果及响应面优化分析,结合夹持输送装置加工简易样机,并于泰安市山东农业大学试验田进行了实地试验以验证优化参数的准确性。试验地菠菜为条播种植,为消除试验随机性误差,参照文献[31]的试验参数,调节夹持输送装置的柔性带速、夹持角等参数,选取 6 行菠菜进行采收试验,试验过程如图 20 所示。



图 20 根切铲加工与试验

Fig. 20 Machining and test of shovel

根系在根切铲的铲切作用下被剪断可视为根切合格,故铲根合格率可以验证根切铲的切根能力;本次试验没有加入扶禾装置,若根切铲无铲翼,铲切时土壤会带动根系向前方和两侧产生偏移,导致菠菜偏离夹持输送装置无法收获,会降低菠菜采收率,而铲翼产生的土壤聚拢功能会减小这个问题,故菠菜采收率可以验证根切铲的聚拢能力。

采收试验结束后,进行数据统计与分析,记录每

行菠菜铲根合格率与采收率作为试验的评价标准,采收试验中的铲根合格率和采收率分别为

$$\delta_g = \frac{Z_g}{Z_s} \times 100\%$$

(17)

式中 δ_g ——铲根合格率
 Z_g ——断根的菠菜株数
 Z_s ——采收成功的菠菜株数

$$\delta_c = \frac{Z_c}{Z_a} \times 100\%$$

(18)

式中 δ_c ——菠菜采收率
 Z_c ——拔取收获的株数
 Z_a ——每行菠菜总株数

4.2 试验结果及分析

采收成功的断根菠菜如图 20d 所示,6 组采收试验的根切合格率与采收率如表 9 所示。由表 9 可知,菠菜根切株数与菠菜采收株数并不完全相同,这是由于菠菜长势的差距,或扎根深度的不同所致。若根系扎根较浅,铲刀还未接触到根系,部分菠菜由于根切铲的土壤抬升作用,致使菠菜未完成根切便进入拔取输送装置,此时菠菜采收株数将大于切根株数。

表 9 采收试验结果

Tab. 9 Harvesting test results %

序号	根切合格率	菠菜采收率
1	91	87
2	95	92
3	93	77
4	97	85
5	100	89
6	87	93
平均值	93.8	87.2

最终得到采收试验根切合格率平均值为 93.8% ,采收率平均值为 87.2% 。试验结果表明,根切铲的设计与工作参数的选择可以较好地实现菠菜采收,土壤起垄未对夹持输送过程造成影响。

5 结论

(1)基于离散元法接触力学模型的本构方程,结合菠菜根的生物力学特性,建立了菠菜根柔性体模型,由此结合土壤模型建立了可准确表征实际根土复合体的仿真模型,并对模型的各项参数进行标定。证明了离散元法用于根土复合体领域的研究可行。

(2)根据采收农艺与项目需求,设计了一种根切铲,可以减小铲切阻力并且聚拢根系。通过理论计算与模拟分析,明晰了根切铲的工作机理,确定了

根切铲最优设计参数为: 铲刀滑切角 60° 、刃口角 45° 、铲翼角 76° 、铲翼长度占比 57% 、铲槽面积占比 40% 。

行菠菜采收试验得到菠菜根切合格率平均值为 93.8% , 采收率平均值为 87.2% , 证明了根切铲优化设计的可靠性。本研究可为菠菜采收机设计提供理论支持。

(3) 根据菠菜种植农艺, 设计收获试验装置, 进

参 考 文 献

- [1] 王俊, 杜冬冬, 胡金冰, 等. 蔬菜机械化收获技术及其发展[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 81–87.
WANG Jun, DU Dongdong, HU Jinbing, et al. Vegetable mechanized harvesting technology and its development[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 81–87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140214&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.014. (in Chinese)
- [2] 金月, 肖宏儒, 肖苏伟, 等. 叶菜蔬菜收获机收与装备研究现状及发展趋势[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(9): 72–78.
- [3] 刘东, 肖宏儒, 金月. 叶类蔬菜有序收获机械的研究现状及发展对策[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(3): 27–31.
LIU Dong, XIAO Hongru, JIN Yue. Research status and development countermeasures of orderly harvesting machine of leaf vegetables[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(3): 27–31. (in Chinese)
- [4] 苑进, 刘成良, 胡敏, 等. 一种设施叶菜采收机器人的在轨自走式采收装置及采收方法: CN201510028490.0[P]. 2016–08–24.
- [5] 杨亚川, 莫永京, 王芝芳, 等. 土壤-草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(2): 31–38.
YANG Yachuan, MO Yongjing, WANG Zhifang, et al. Experimental study on anti-water erosion and shear strength of soil-root composite[J]. Journal of China Agricultural University, 1996, 1(2): 31–38. (in Chinese)
- [6] 田佳, 曹兵, 及金楠, 等. 花棒根-土复合体直剪试验的有限元数值模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 152–158.
TIAN Jia, CAO Bing, JI Jinnan, et al. Numerical simulation and validation test of direct shear test for root-soil composite of Hedysarum scoparium using finite element method[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 152–158. (in Chinese)
- [7] ABDUL Mounem Mouazen, MIKL S Neményi. Finite element analysis of subsoiler cutting in non-homogeneous sandy loam soil[J]. Soil and Tillage Research. 1999, 51(1): 1–15.
- [8] 高国华, 谢海峰, 王天宝, 等. 设施蔬菜收获机拉拔力学性能 EDEM 仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 24–31.
GAO Guohua, XIE Haifeng, WANG Tianbao, et al. EDEM simulation and experiment of pullout force of protected vegetable harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 24–31. (in Chinese)
- [9] 方会敏, 姬长英, AHMED Al Ta, 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 Al Ta, et al. Simulation analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade 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)
- [10] LENAERTS B, AERTSEN T, TIJSKENS E, et al. Simulation of grain-straw separation by discrete element modeling with bendable straw particles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 101(10): 24–33.
- [11] 庞声海. 关于滑切理论与滑切角的选择[J]. 华中农学院学报, 1982, 6(1): 64–69.
PANG Shenghai. On the theory of sliding cutting and the choice of its angle[J]. Journal of Huazhong Agricultural College, 1982, 6(1): 64–69. (in Chinese)
- [12] 严霖元. 对农业机械工作部件滑切角的探讨[J]. 江西农业大学学报, 1991, 13(1): 64–68.
- [13] 尤泳, 贺长彬, 王德成, 等. 土壤耕作部件极窄刀齿与土壤作用关系研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 1–11.
YOU Yong, HE Changbin, WANG Decheng, et al. Interaction relationship between soil and very narrow tine during penetration process[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 1–11. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170606&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.006. (in Chinese)
- [14] 周华, 张文良, 杨全军, 等. 滑切型自激振动减阻深松装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 71–78.
ZHOU Hua, ZHANG Wenliang, YANG Quanjun, et al. Design and experiment of sliding cutting self-excited vibration drag reduction subsoiling device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 71–78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190508&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.008. (in Chinese)
- [15] 辛青青, 吕钊钦, 张万枝, 等. 马铃薯成熟期秧蔓的机械物理特性参数研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(1): 179–184.
XIN Qingqing, LÜ Zhaoqin, ZHANG Wanzhi, et al. Study on mechanical and physical parameters of potato vine at maturity stage[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(1): 179–184. (in Chinese)
- [16] HORABIK J, PARAFINIUK P, MOLENDAM M, et al. Experiments and discrete element method simulations of distribution of static load of grain bedding at bottom of shallow model silo[J]. Biosystems Engineering, 2016, 149: 60–71.
- [17] HANG C, GAO X, YUAN M, et al. Discrete element simulations and experiments of soil disturbance as affected by the tine spacing of subsoiler[J]. Biosystems Engineering, 2018, 168: 73–82.
- [18] WEERASEKARA N S, POWELL M S, CLEARY P W, et al. The contribution of DEM to the science of comminution[J]. Powder Technology, 2013, 248: 3–24.
- [19] 韩燕龙, 贾富国, 曾勇, 等. 受碾区域内颗粒轴向流动特性的离散元模拟[J]. 物理学报, 2015, 64(23): 176–184.
HAN Yanlong, JIA Fuguo, ZENG Yong, et al. Granular axial flow characteristics in a grinding area studied by discrete element method[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(23): 176–184. (in Chinese)
- [20] 王笑丹, 王洪美, 韩云秀, 等. 基于离散元法的牛肉咀嚼破碎模型构建[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 228–234.

- WANG Xiaodan, WANG Hongmei, HAN Yunxiu, et al. Structure of beef chewing model based on discrete element method [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 228–234. (in Chinese)
- [21] 赖庆辉, 袁海阔, 胡子武, 等. 滚筒板齿式三七种苗分离装置结构设计及试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 121–129.
LAI Qinghui, YUAN Haikuo, HU Ziwu, et al. Design and experiment on seedling separation device of panax notoginseng seedlings based on roller zigzag mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 121–129. (in Chinese)
- [22] 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 polyline soil breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[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)
- [23] MAK J, CHEN Y, SADEK M A. Determining parameters of a discrete element model for soil-tool interaction[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 118(5): 117–122.
- [24] 赵旭, 张祖立, 黄秋波, 等. 玉米根土复合体剪切性能试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 126–132.
ZHAO Xu, ZHANG Zuli, HUANG Qiubo, et al. Cutting performance of corn root-soil composite[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 126–132. (in Chinese)
- [25] 郑乐, 罗锡文, 曾山, 等. 水稻根茬-土壤复合体剪切特性试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 63–71.
ZHENG Le, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Shear characteristics of rice root-soil composite[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 63–71. (in Chinese)
- [26] ASAF Z, RUBINSTEIN D, SHMULEVICH I. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 92(1–2): 227–242.
- [27] 于昭洋, 胡志超, 王海鸥, 等. 大蒜果秧分离机构参数优化及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 40–46.
YU Zhaoyang, HU Zhichao, WANG Haiou, et al. Parameters optimization and experiment of garlic picking mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 40–46. (in Chinese)
- [28] 张敏, 金诚谦, 梁苏宁, 等. 风筛选式油菜联合收割机清选机构参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 8–15.
ZHANG Min, JIN Chengqian, LIANG Suning, et al. Parameter optimization and experiment on air-screen cleaning device of rapeseed combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(24): 8–15. (in Chinese)
- [29] 丁素明, 薛新宇, 方金豹, 等. 手持式风送授粉机工作参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 68–75.
DING Suming, XUE Xinyu, FANG Jinbao, et al. Parameter optimization and experiment of air-assisted pollination device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8): 68–75. (in Chinese)
- [30] 孙亚朋, 董向前, 宋建农, 等. 振动深松试验台作业参数减阻减振优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 43–49.
SUN Yapeng, DONG Xiangqian, SONG Jiannong, et al. Parameter optimization of vibration subsoiler test bed for reducing resistance and vibration [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 43–49. (in Chinese)
- [31] 邹亮亮, 刘雪美, 李金光, 等. 基于流变特性分析的菠菜有序收获机夹持输送装置研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 72–79.
ZOU Liangliang, LIU Xuemei, LI Jinguang, et al. Clamping conveyer device of ordered spinach harvester based on rheological property analysis[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 72–79. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191008&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 10. 008. (in Chinese)

(上接第 84 页)

- [15] Ferrari futura automated transplanter [EB/OL]. [2018–06–30]. <https://ferrariostruzioni.com/en/tray-planters/8-futura-automated-transplanter.html>.
- [16] 崔巍, 赵亮, 宋建农, 等. 吊杯式移栽机栽植器运动学分析与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 35–38, 34.
CUI Wei, ZHAO Liang, SONG Jiannong, et al. Kinematic analysis and experiment of dibble-type planting devices [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 35–38, 34. (in Chinese)
- [17] YANG Y, TING K C, GIACOMELLI G A. Factors affecting performance of sliding-needles gripper during robotic transplanting of seedlings[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 7(4): 493–498.
- [18] 金鑫, 姬江涛, 刘卫想, 等. 基于钵苗运动动力学模型的鸭嘴式移栽机结构优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 58–67.
JIN Xin, JI Jiangtao, LIU Weixiang, et al. Structural optimization of duckbilled transplanter based on dynamic model of pot seedling movement [J]. Transactions of the CASE, 2018, 34(9): 58–67. (in Chinese)
- [19] 中国机械工业联合会. JB/T 10291—2013 旱地栽植机械[S]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [20] 王英. 面向高立苗率要求的栽植机构参数优化与试验研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2014.
WANG Ying. Parameter optimization and experimental study on high seedling erectness rate oriented planting mechanism [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2014. (in Chinese)