· 农产品加工工程 ·

青菜头缩短茎滑切刀研制

向 旺[1,2]，孙玉华[1,2,3]，刘凡一[1,2,3]，李明生[1,2,3]，
谢守勇[1,2,3※]，柯 超[1,2]，黄 窈[1,2]

（1. 西南大学工程技术学院，重庆 400715；2. 西南农业智能装备创新中心，重庆 400715；
3. 丘陵山区农业装备重庆市重点实验室，重庆 400715）

摘 要：青菜头机械化收获水平低下是制约青菜头产业发展的重要原因之一。为解决青菜头机械化收获过程中缩短茎切割难度大和农机与农艺融合程度低等问题，该研究提出了一款滑切式青菜头收获机并对其滑切刀作业参数进行分析与试验。首先，基于青菜头收获农艺要求阐述青菜头收获机整机及其切根装置的结构及工作原理，根据受力分析确定滑切刀安装方式。然后，对紫色土壤和滑切刀的接触参数进行标定并基于 EDEM 建立土壤-滑切刀互作模型，仿真分析不同作业速度、刀具夹角对滑切刀作业阻力的影响。结果表明：1）相同速度下，滑切刀交叉夹角与作业阻力负相关；2）相同滑切刀角度下，滑切刀作业阻力与作业速度正相关。以滑切刀切削阻力为评价指标，作业速度、刀具夹角、切割距离为影响因素进行切割试验并对试验参数进行优化，结果表明：滑切刀作业速度与切削阻力呈正相关，切割距离与切削阻力呈负相关，刀具夹角从 60°到 120°，切削阻力先减小再增大。影响切削阻力大小的主次因素顺序为作业速度、刀具夹角和切割距离。优化圆整后的滑切刀作业速度为 0.1 m/s，刀具夹角 65°，切割距离 20 mm，3 次重复试验得到的切削阻力依次为 141.24 、156.32 和 150.65 N，与理论切削阻力 128.63N 相对误差分别为 9.8%、21.53% 和 17.12%，较 Box-Behnken 试验平均切削阻力分别下降 44.30%，38.35% 和 40.59%，验证了滑切刀作业参数优化的有效性。研究结果可为青菜头机械化收获提供参考，具有重要的工程应用价值。

关键词：农业机械；试验；离散元；滑切刀；土槽试验；青菜头
doi：10.11975/j.issn.1002-6819.202305174
中图分类号：S223.4 **文献标志码：**A **文章编号：**1002-6819(2023)-16-0266-10

向旺，孙玉华，刘凡一，等. 青菜头缩短茎滑切刀研制[J]. 农业工程学报，2023，39(16)：266-275. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305174 http://www.tcsae.org
XIANG Wang, SUN Yuhua, LIU Fanyi, et al. Development of the sliding cutter for the shortened stem of tumorous stem mustard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(16): 266-275. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305174 http://www.tcsae.org

0 引 言

青菜头属被子植物门，双子叶植物纲科，学名茎瘤芥，主要种植在重庆、浙江和四川地区。其中，重庆地区青菜头种植面积约占全国种植面积一半，2022 年总产值超 150 亿元[1]。但是目前重庆地区青菜头的采摘仍然依靠人工，收获季节经常出现用工难、用工贵等问题；由于收获时间紧，人工劳动强度大，采摘效率低，造成农户种植青菜头积极性下降，制约了青菜头种植业的发展。因此，青菜头的机械化收获必须加快研究进程[2]。

由于种植不规范，导致成熟期的青菜头叶片易倒伏，缩短茎弯曲严重，使得机械化收获难度大。近年来，国内研究人员对青菜头的机械化收获开展了大量的研究并取得了一定的成果。张涛等[3] 基于青菜头生物特性与丘陵山区作业环境设计了一款具有柔性夹持功能的青菜头收获机，可降低青菜头的损伤率；龚镜一等[4] 基于青菜头物理特性，设计了集扶叶、夹持拔取、输送及切叶等功能为一体的榨菜收获机，在此基础上，黎奎良等[5] 设计了具有自动对行匹配微耕机作业的青菜头切根装置；冯伟等[6] 设计了螺旋喂入式的青菜头收获机，并通过正交试验获取了螺旋喂入装置的最佳作业参数；金月等[7] 设计了能同时完成四行作业的手扶式青菜头收获机，该机器集成了自动导正、扶叶夹持、独立仿形、精准切割、输送运输等功能；叶俊杰[8] 设计了一款适用于丘陵山区的手扶式青菜头收获机；吴渭尧[9-10] 针对余姚地区设计了可乘坐式的青菜收获机，但机型较为庞大，在丘陵地区适用性较低。为更好地获取青菜头的物理特性，郝林杰等[11] 开展了一系列试验，旨在为开发性能较好的青菜头收获机奠定基础。

青菜头属于中国特色农产品，国外鲜有种植也没有专用的收获机具，但类似收获机械可为青菜头收获机具的研制提供思路。DIDAMONY 等[12] 研发了卷心菜收获机，利用所设计滑切刀盘可精确完成卷心菜的切根且损伤率极低；KIM 等[13] 研制了自走式大白菜收获机，设计的牵引机构能够将大白菜轻松拔出；YASMEEN 等[14] 设计了两行胡萝卜收获机，利用其挖掘机构和采摘机构可

收稿日期：2023-05-21 修订日期：2023-06-30
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目 (52105276)；重庆市技术创新与应用发展专项重点项目 (cstc2021jscxx-gksbX0019)
作者简介：向旺，研究方向为智能农机装备设计与开发。
Email：1164081532@qq.com
※通信作者：谢守勇，教授，博士生导师，研究方向为智能农机装备开发和机电一体化。Email：xsyswu@163.com

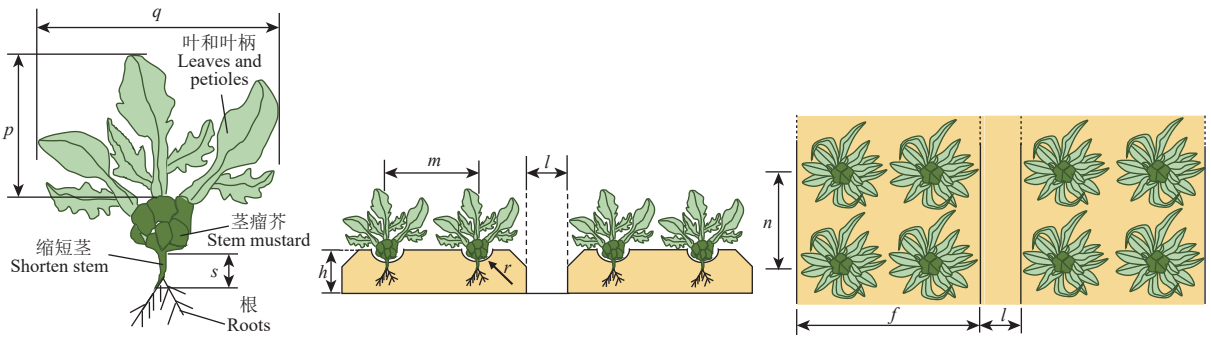
大幅提高胡萝卜的收获效率。

综上所述，丘陵地区青菜头的机械化收获还处于起步阶段，相关人员虽已研发多种青菜头收获机，但现有青菜头收获机存在农机与农艺融合程度不足、成熟期青菜头瘤状茎贴近地面，切根过程易造成损伤；缩短茎抗剪切强度高，切割难度大；青菜头叶片肥大导致运输通道易堵塞等问题。本文根据丘陵山区青菜头农艺种植要求，研制了一种青菜头缩短茎滑切刀，拟解决现有青菜头收获机切根难等问题，主要研究内容如下：在分析滑切式青菜头收获机及其切根夹叶机构工作原理的基础上基于 EDEM 构建土壤-刀具互作阻力模型并进行土槽试验，开展滑切刀切削阻力 Box-Behnken 试验并对作业参数进行优化。

1　整机及切根夹叶机构工作原理

1.1　青菜头种植农艺

截至目前，青菜头的种植方式还没有统一标准，西南地区青菜头种植行距 30～40 cm，株距 25～40 cm，浙江地区青菜头种植行距 25 cm，株距 17 cm，均采用厢面种植，单垄 2 行或 4 行。本研究整机设计以重庆渝北大盛镇试验种植基地的青菜头种植农艺为设计标准，种植行距 m 为 33 cm，株距 n 为 33 cm，起垄高度 h 为 30 cm，垄沟宽度 l 为 30 cm，垄宽 f 为 160 cm，青菜头土壤窝洞曲率半径 r(和青菜头大小相关)，单垄 2 行。青菜头主要由叶、茎瘤芥、缩短茎、根须组成。通常成熟青菜头叶自然展开宽度 q 为 60～130 cm，叶和叶柄高度 p 为 60～80 cm，缩短茎长度 s 为 20～30 cm，如图 1 所示。



a. 青菜头模型示意图
a. Schematic diagram of tumorous stem mustard model

b. 截面图
b. Section view

c. 俯视图
c. Top view

注：m 为行距，cm；n 为株距，cm；h 为起垄高度，cm；f 为垄宽，cm；l 为垄沟宽度，cm；r 为青菜头土壤窝洞曲率半径，cm；q 为青菜头叶自然展开宽度，cm；p 为叶和叶柄高度，cm；s 为缩短茎长度，cm。
Note: m is the row spacing, cm; n is the plant spacing , cm; h is the ridge height, cm; f is the width of the ridge, cm; l is the width of the furrow, cm; r is the radius of the soil cavity of tumorous stem mustard, cm; q is the natural unfolded width of tumorous stem mustard leaf, cm; p is the height of leaf and petiole, cm; s is the shorten stem length,cm.

图 1　青菜头及其种植农艺示意图
Fig.1　Schematic diagram of tumorous stem mustard and its planting agronomy

1.2　整机结构及工作原理

滑切式青菜头收获机的工作要求是完成对青菜头缩短茎、叶柄、叶的切除，然后收集茎瘤芥。该机器主要由控制系统，切根夹叶机构，倾斜夹持传送机构、传动系统、动力底盘组成，可同时完成 2 行青菜头的收获，其结构如图 2 所示，主要参数如表 1 所示。

作业前，通过机械推杆将倾斜夹持机架调试到合适的倾斜角度，切根夹叶机构的滑切刀和仿形支撑架调试到合适高度。作业时，电机带动同步带转动，在动力底盘的推动下滑切刀切断缩短茎，同步带夹持住叶柄传送，在倾斜夹持带上切掉青菜头的叶和叶柄，最后茎瘤芥掉入收集箱中。本文重点对切根夹叶机构的滑切刀进行研究。

为使青菜头叶柄更好从切根夹叶装置过渡到倾斜夹持传送机构上，切根夹叶装置与地面并不平行。

1.3　切根夹叶机构及工作原理

切根夹叶机构设计 2 把滑切刀组合使用，完成对青菜头缩短茎的切割和青菜头的夹持输送，其主要由电机、仿形支撑架、夹持同步带、同步带张紧装置、同步轮和滑切刀组成，如图 3 所示。其中，仿形支撑架不仅可以起到仿地形作用，而且可以扶起倒伏的菜叶。作业时，电机带动同步带运动，在同步带摩擦力作用下夹住青菜头叶柄，张紧轮顶住叶柄，在底盘推动力作用下切割青菜头的缩短茎，然后继续夹持传送到倾斜夹持同步带上，完成切叶并装箱。

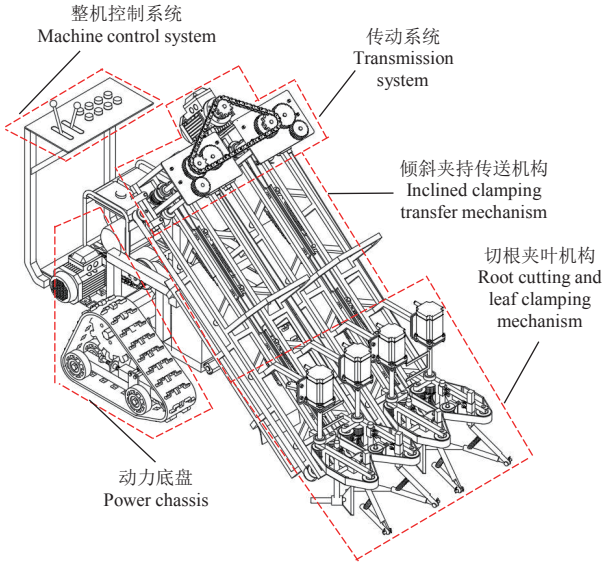
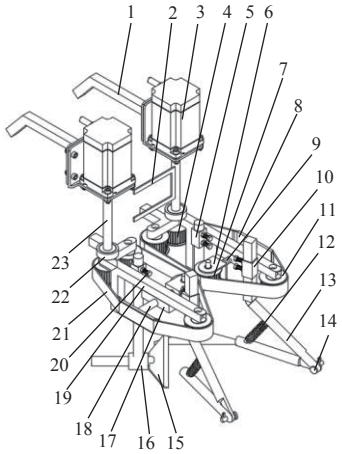


图 2　青菜头收获机结构图
Fig.2　Structural diagram of mustard harvester

表 1 青菜头收获机主要参数

Table 1 Main parameters of mustard harvester

参数 Parameters	数值 Values
整机尺寸 (长×宽×高)/mm	2000×770×1 300
底盘动力/kW	4
收获行数	2
前进速度/(km·h^{-1})	0～0.5
收获行距/mm	270～490
倾斜机架可调角度 (与地面夹角)/(°)	30～60
理论工作效率/(hm^2·h^{-1})	0.039
切根夹叶装置机架倾斜角度 (与地面夹角)/(°)	10



1.电机支座 2.抛叶杆 3.电机 4.主动同步轮 5.刀具调整杆固定装置 6.张紧轮固定叉 7.张紧轮 8.张紧板 9.张紧弹簧 10.仿形支撑架固定装置 11.从动同步轮 12.仿形支撑装置弹簧 13.仿形支撑架 14.插销 15.滑切刀 16.刀具调整杆 17.弹簧限位架 18.张紧辊 19.机架 20.螺栓 21.同步带 22.轴承座 23.电机轴

1.Motor support 2.Leaf throwing lever 3.Motor 4.Active synchronous wheel 5.Cutter regulating lever fixing device 6.Tensioning wheel fixing bracket 7.Tensioning wheel 8.Tensioning plate 9. Tensioning spring 10.Profiling support frame fixing device 11.Driven synchronous wheel 12.Profiling support device spring 13.Profiling support frame 14.Latch pin 15.Sliding cutter 16.Cutter regulating lever 17.Spring limit bracket 18.Tension roller 19.Rack 20.Bolt 21.Timing belt 22.Bearing seat 23.Motor shaft

图 3 青菜头切根夹叶机构组成

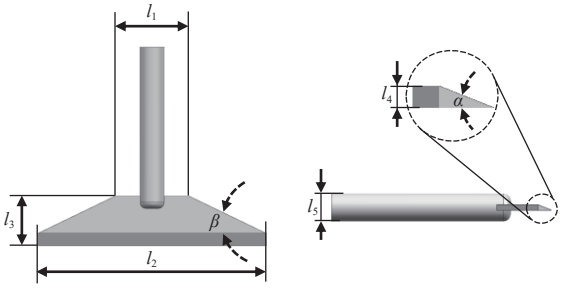
Fig.3 Composition of the root cutting and leaf clamping mechanism for tumorous stem mustard

1.4 滑切刀设计与安装

青菜头缩短茎切割方式主要有 3 种：往复式、旋切式和滑切式。往复式需要贴近地面切割，可能损伤茎瘤芥[3]；旋切式对行要求高，易磨损刀具和产生飞土，功耗大[6-7]；滑动式切割效果较好且功耗低[4-5]。因此，本文选择滑切式对缩短茎进行切割。

HSS(高速钢) 通常用来制造薄刃和耐冲击的刀具，具有较好的强度和韧性，所以，选用 HSS 作为滑切刀制作材料。在保证滑切刀作业强度前提下确定了滑切刀形状及相关参数，如图 4 所示，刀背长度 l_1 为 60 mm，刀刃长度 l_2 为 185 mm，刀面宽度 l_3 为 40 mm，刀具厚度 l_4 为 4 mm，刀柄直径 l_5 为 20 mm，刃口斜度 α 为 21.8°，刃口与刀边夹角 β 为 25.6°。

为加强 2 把滑切刀的整体性，使 2 把滑切刀刀面重叠，如图 5 所示，单行 2 把滑切刀呈 V 字形对称布置。作业时，滑切刀通常深入土层数厘米，为减小刀具前进阻力和保证切割效果，滑切刀角度和高度可进行调整，滑切刀刀刃在 xoy 面投影夹角为 γ，在 xoz 面的投影与其水平面的夹角为 φ，两刀具调整杆圆心距 d 设置为 180 mm。



a. 俯视图 a. Top view　　b. 侧视图 b. Side view

注：l_1 是刀背长度，mm；l_2 是刀刃长度，mm；l_3 是刀面宽度，mm；l_4 是刀具厚度，mm；l_5 是刀柄直径，mm；α 是刃口斜度，(°)；β 是刃口与侧边夹角，(°)。

Note: l_1 is the back length of cutter, mm; l_2 is the length of cutting edge, mm; l_3 is the width of cutter face, mm; l_4 is the thickness of cutter, mm; l_5 is the diameter of cutter handle, mm; α is the slope of cutting edge, (°); β is the angle between the cutting edge and the side, (°).

图 4 滑切刀结构参数示意图

Fig.4 Sliding cutter structure parameters diagram

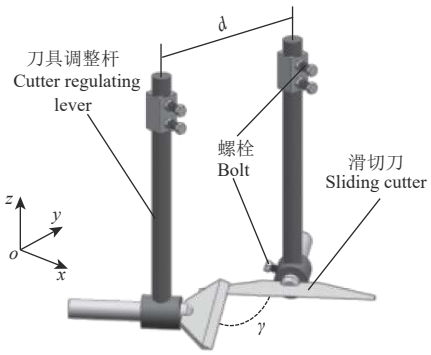


图 5 滑切刀安装示意图

Fig.5 Installation diagram of sliding cutter

1.5 滑切过程受力分析

为清楚滑切刀不同安装角度对其作业阻力的影响，对滑切刀进行受力分析。滑切刀在三角履带底盘推动下对缩短茎进行切割，此过程中滑切刀主要受底盘推力，切削阻力，土壤支持力，土壤摩擦力，土壤破碎力，机身重力等。选取单把滑切刀与缩短茎接触处进行分析，如图 6 所示。

由滑切过程受力分析可知：

$$F_a = F_x \cos\theta \tag{1}$$

$$F_d = F_b + F_c \tag{2}$$

$$F_z = F_p \tag{3}$$

$$F_p = \frac{1}{4}kG + \frac{F_a \sin\theta}{\cos\varphi} \tag{4}$$

式中 k 是滑切刀和仿形支撑架承重的比值；G 是切根夹叶机构承受的机身重力，N。

$$F_{f1} = \mu G' \tag{5}$$

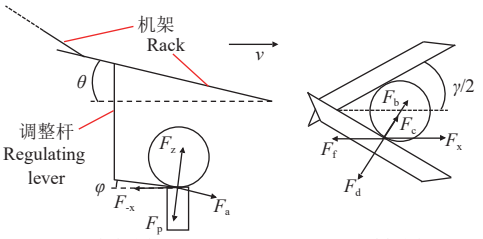
$$F_{f2} = \mu F_z \tag{6}$$

$$F_{-x} = (F_{f1} + F_{f2})\cos\varphi + F_d \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \tag{7}$$

式中 μ 是土壤-刀具动摩擦系数；G'是滑切刀上表面土壤

重力，N。

式（4）表明，要使滑切刀下表面受到的压力及摩擦力最小，滑切刀刀刃与 *xoz* 面水平夹角φ应为 0°，同时保证$\varphi<\theta$，可避免倾斜机身在底盘推动力的作用下陷入土层。



a. 侧视图　　b. 俯视图
a. Side view　　b. Top view

注：F_{-x}是前进方向阻力，N；F_a是平行切根夹叶机架的推力，N；F_z是土壤对刀具的支持力，N；F_p为滑切刀对土壤的压力，N；F_x为底盘推力，N；F_f是土壤摩擦力，N；F_b是切削力，N；F_c是刀具对土壤的破碎力，N；F_d是滑切刀受到的径向阻力，N；θ是切根夹叶机构机架与地面的夹角，(°)；v是前进方向速度，m·s^{-1}。

Note: F_{-x} is the resistance in the forward direction, N; F_a is the thrust of the parallel root-cutting and leaf-clamping frame, N; F_z is the support force of the soil on cutter, N; F_p is the pressure of slip cutting on the soil, N; F_x is the chassis thrust, N; F_f is the soil friction, N; F_b is the cutting force, N; F_c is the breaking force of cutter on the soil, N; F_d is the radial resistance on sliding cutter, N; θ is the angle between the frame of the root-cutting and leaf-clamping mechanism and the ground, (°); v is the speed in the forward direction, m·s^{-1}.

图 6　滑切刀切割过程受力分析图

Fig.6　Force analysis of sliding cutter during cutting process

2　土壤-滑切刀互作模型

田间作业时，滑切刀绝大多数时间是克服土壤阻力做功，且滑切刀作业阻力是影响青菜头收获机能耗的重要因素。因此，有必要探究作业时滑切刀与土壤的互作关系。本文基于离散元法（discrete element method）建立土壤-滑切刀互作模型，模拟滑切刀在土壤中作业情况，分析滑切刀作业速度和两滑切刀夹角对刀具作业阻力的影响。

2.1　接触力学模型

西南地区耕地主要以紫色土壤为主，富含钙质和磷、钾等营养元素，但黏性较高易板结，土壤颗粒之间的黏性是滑切刀作业过程中阻力的重要影响因素，因此，在 EDEM 2020 版本中选用 Hertz-Mindlin with Bonding 模型作为土壤-土壤颗粒之间的接触模型，根据文献 [15-17]，忽略土壤与刀具之间的粘附力，土壤-刀具之间的接触模型为 Hertz-Mindlin 模型，选择默认的 Standard Rolling Friction 模型作为土-土壤，土壤-刀具的滚动摩擦模型。

土壤颗粒与刀具之间的接触力为[18]

$$F_n^s = -k_n\delta_n^{\frac{3}{2}} \tag{8}$$

$$F_n^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\xi\sqrt{k_n m^*}\dot{\delta}_n \tag{9}$$

$$F_t^s = -k_t\delta_t \tag{10}$$

$$F_t^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\xi\sqrt{k_t m^*}\dot{\delta}_t \tag{11}$$

式中F_n^s和F_n^d分别为法向弹性力和法向阻尼力，N；F_t^s和F_t^d分别为切向弹性力和切向阻尼力，N；k_n是法向刚度系数，$k_n = 2E^*(r^*\delta_n)^{1/2}$，N/m；$E^*$是等效杨氏模量，$1/E^* = [(1-v_1^2)/E_1 + (1-v_2^2)/E_2]$，Pa；$E_1$和$E_2$是两接触物杨氏模量，$v_1$和$v_2$分别是两接触物的泊松比，$r^*$是等效接触半径，$1/r^* = 1/r_1 + 1/r_2$，m；$r_1$和$r_2$是两接触物的接触半径，m；$\delta_n$是相对位移法向分量，m；$k_t$是切向刚度系数，$k_t = 8G^*(r^*\delta_n)^{1/2}$，N/m；$G^*$是等效剪切模量，$1/G^* = 1/G_1 + 1/G_2$，Pa；$G_1$和$G_2$是两接触物的剪切模量；$\delta_t$是相对位移切向分量，m；$\xi$是阻尼比，$\xi = \ln\lambda/(\ln^2\lambda+\pi^2)^{1/2}$，$\lambda$是恢复系数；$m^*$是等效质量，$1/m^* = 1/m_1 + 1/m_2$，kg，$m_1$和$m_2$是两接触物质量，kg。$\dot{\delta}_n$和$\dot{\delta}_t$分别是相对速度法向分量和相对速度切向分量，m/s。

土壤颗粒粘结之前按照 Hertz-Mindlin 模型计算，粘结后土壤颗粒的法向力、切向力和力矩重置为 0，并在每个时间步长重新对法向力、切向力和力矩进行计算[18-22]，如式（12）～（15）。粘结后土壤颗粒的振动接触模型如图 7 所示。

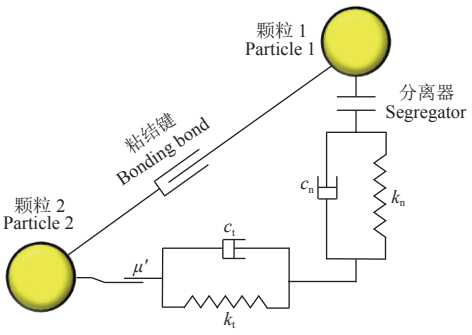
$$\delta F_n = -v_n k_n S\delta_t \tag{12}$$

$$\delta F_t = -v_t k_t S\delta_t \tag{13}$$

$$\delta M_n = -\omega_n k_t J\delta_t \tag{14}$$

$$\delta M_t = -\omega_t k_n J\frac{\delta_t}{2} \tag{15}$$

式中F_n和F_t分别是法向和切向接触力，N；M_n和M_t是法向和切向力矩，N·m；v_n和v_t分别是土壤颗粒法向和切向速度，m/s；ω_n和ω_t分别是法向和切向角速度，rad/s；S是粘接面积，$S = \pi R_B^2$，m^2；R_B是粘结半径，m；J是土壤颗粒转动惯量，$J = \pi R_B^4/2$。



注：c_n和c_t分别是法向和切向阻尼比，k_n和k_t分别为法向和切向刚度，μ'为土壤间摩擦系数。

Note: c_n and c_t are the normal and tangential damping ratios, respectively, k_n and k_t are the normal and tangential stiffnesses, respectively, and μ' is the friction coefficient between soils.

图 7　土壤颗粒接触模型

Fig.7　Soil particle contact model

当土壤颗粒间的粘结键所受法向力和切向力超过预设值时便断裂，条件如式（16）～（17）所示。断裂后的土壤颗粒作为硬球进行计算求解。

$$\sigma < \frac{-F_n}{S} + \frac{2M_t}{J}R_B \tag{16}$$

$$\tau < \frac{-F_t}{S} + \frac{M_n}{J} R_B \quad (17)$$

式中 σ 和 τ 是预设的正应力和切应力，Pa。

2.2 离散元仿真参数

2.2.1 土壤本征参数

土壤样品为青菜头种植区域内的紫色土壤，利用不锈钢质环刀（规格：φ79.8×20 mm，100cm^3，55 g）取样 5 次，对 5 次取样土壤及环刀用电子天平（精度 0.01 g）称量，然后计算得到平均土壤密度为 1 720 kg/m^3；采用恒温箱烘干法测定土壤的平均含水率为 11.52%；取 100 g 烘干的土壤样品，用孔径大小为 2、1 和 0.05 mm 筛分器进行筛分，然后用电子天平进行称量，测得土壤颗粒直径≥2、1～2、0.05～1 和<0.05 mm 的质量分数为 25.15%、31.63%、19.20% 和 0.86%；采用无底圆筒（内径 40 mm，高 200 mm）提升法测定土壤休止角并利用 Sobel 算法提取土壤边缘曲线，测得土壤休止角为 33.1°，如图 8 所示。土壤泊松比和剪切模量参照文献 [23] 分别确定为 0.35 和 1.02×10^7 Pa。

a. 土壤堆积图 b. Sobel 边缘检测
a. Soil accumulation map b. Sobel edge detection

图 8 土壤休止角测量

Fig.8 Repose angle measurement of soil

2.2.2 接触参数

土壤的接触参数无法直接测定，需要通过虚拟标定获得。EDEM 中 GEMM wizard 集成了大量颗粒模型数据，会根据颗粒的本征参数推荐接触参数。根据 GEMM 数据库提供的推荐接触参数，同时参照文献 [23-26] 确定土壤-土壤恢复系数，土壤-土壤静摩擦系数，土壤-土壤动摩擦系数，HSS 材料密度，HSS 泊松比，HSS 杨氏模量，土壤-HSS 恢复系数，土壤-HSS 静摩擦系数，土壤-HSS 动摩擦系数等相关参数，如表 2 所示。

表 2 土壤-刀具仿真参数

Table 2 Soil-tool simulation parameters

参数 Parameters	数值 Values
土壤密度/(g·cm^{-3})	1.72
土壤泊松比	0.35
土壤剪切模量/Pa	1.02×10^7
土壤-土壤恢复系数	0.3
土壤-土壤静摩擦系数	0.75
土壤-土壤动摩擦系数	0.231
高速钢密度/(g·cm^{-3})	8.7
高速钢泊松比	0.3
高速钢杨氏模量/Pa	2.1×10^{11}
土壤-高速钢恢复系数	0.3
土壤-高速钢静摩擦系数	1.04
土壤-高速钢动摩擦系数	0.228

在 Bonding 接触模型中还需设置单位面积法向刚度、单位面积切向刚度、临界法向应力、临界切向应力和粘结半径。参照文献 [27-28]，为减小参数标定数量，设定单位面积法向刚度等于单位面积切向刚度，临界法向应力等于临界切向应力，其中粘结半径与含水率和颗粒大小有关，具体如表 3 所示。

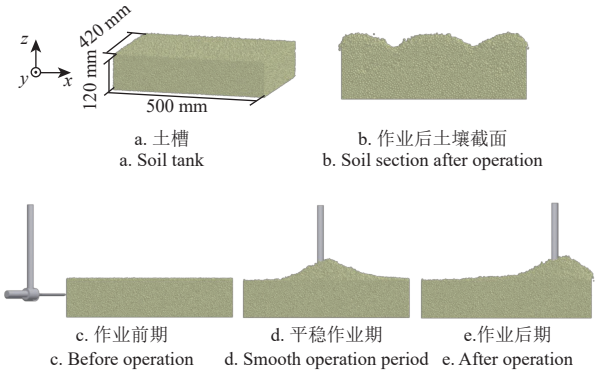
表 3 粘接键仿真参数

Table 3 Sticky bond simulation parameters

参数 Parameters	数值 Values
单位面积法向刚度/(N·m^{-3})	2×10^6
单位面积切向刚度/(N·m^{-3})	2×10^6
临界法向应力/Pa	1.5×10^4
临界切向应力/Pa	1.5×10^4
粘结半径/mm	3

2.3 土壤-刀具互作模型仿真及结果分析

模拟单行 2 把滑切刀在土壤中的运动情况，建立一个 500 mm×420 mm×120 mm 的土槽，选择土壤基质颗粒模型为单球型，为避免仿真时间过长，结合粒径分布，颗粒半径范围设定在 1.5～3 mm，颗粒工厂生成模式为动态无限数量并填充土槽。按照常规作业情况设置滑切刀刀面距土壤表层 50 mm；根据青菜头收获机理论作业效率，设置滑切刀作业速度为 0.1、0.2、0.3 和 0.4 m/s；根据式（7）设置两滑切刀夹角分别为 60°、90°和 120°。试验共进行 12 组，仿真作业过程如图 9 所示。



a. 土槽 b. 作业后土壤截面
a. Soil tank b. Soil section after operation

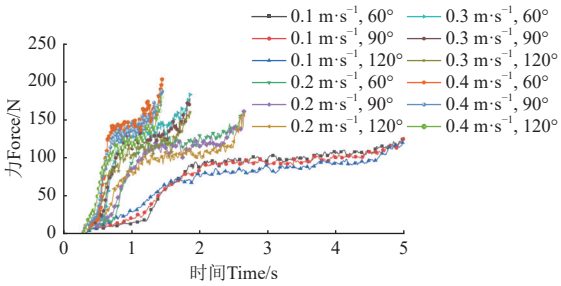
c. 作业前期 d. 平稳作业期 e.作业后期
c. Before operation d. Smooth operation period e. After operation

图 9 土壤-刀具互作过程

Fig.9 Soil-cutter interaction process

从图 9 可知，作业时，滑切刀及其调整杆松动土壤并带动土壤颗粒运动，随着滑切刀的推进，土壤颗粒逐渐堆积在滑切刀表面，造成少量壅土，作业后的土槽横截面呈驼峰形。在 Analyst 中选择 x 方向即刀具前进方向阻力作为刀具入土作业的阻力，仿真过程中滑切刀作业阻力变化规律如图 10 所示。前 0.3 s 为土壤颗粒模型生成并填充土槽以及土壤颗粒之间形成稳定 Bond 键的过程，之后为刀具作业时间。为便于探寻不同参数对刀具阻力的影响规律，排除土槽边界的干扰，图 10 中数据截取自无边界干扰作业阶段。

从图 10 可知，滑切刀作业速度越快，受到的阻力越大，其原因是单位时间内破碎的土壤增多，阻力增大；相同速度下，在某一时间内滑切刀夹角与其作业速度呈正相关，超过这一速度则呈负相关，其原因是这一时间之前滑切刀还未完全进去土槽之中，滑切刀夹角越大，单位时间内与土壤的接触面积更大，土壤颗粒之间的粘结键数量破坏得更多，阻力增大。滑切刀完全进入土槽后，由于滑切刀夹角越小，单位时间内与土壤颗粒作用的横截面积小，导致滑切刀作业阻力越大。



注：图例数据为滑切刀作业速度和夹角。
Note: The datas in legend mean the working speed and included angle of the sliding cutter.

图 10　刀具作业阻力
Fig.10　Cutter working resistance

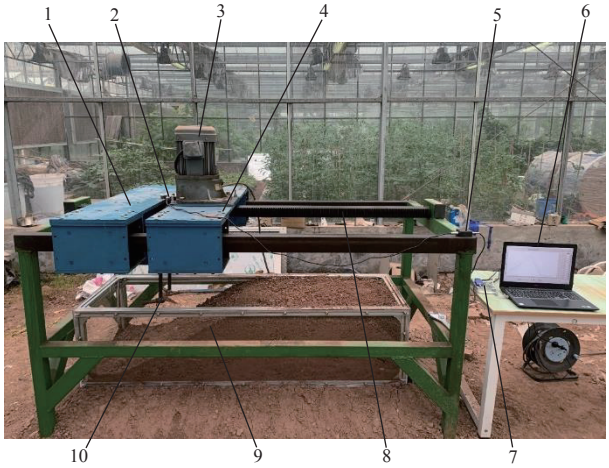
滑切刀完全入土后为稳定作业阶段，该阶段滑切刀作业速度在 0.1 m/s 时，最大阻力为 214.29 N，刀具夹角在 60°、90°、120°的平均作业阻力分别为 107.38、103.60 和 94.64 N，作业速度在 0.2、0.3 和 0.4 m/s 时最大阻力分别为 193.15、169.49 和 133.93 N，在 60°、90°、120°的平均作业阻力依次为 133.07、125.80 和 114.44 N；147.01、137.61 和 123.70 N；156.19、146.97 和 132.24 N。

2.4　土槽试验

为验证仿真作业阻力分析结果的可靠性，搭建土槽台架进行试验验证。

2.4.1　试验条件

试验地点在西南大学大棚试验基地，试验时间为 6 月 25 日，土槽土壤为西南地区典型紫色土壤，受季节气温及环境影响土壤含水率为 5.36%，土槽尺寸为 1 700 mm×600 mm ×450 mm，试验平台设备有三相电机（WSS-4P 2.2 kW）、拉力传感器（JLBS-1 型，量程 500 kg）、变频器、数据采集笔记本电脑，如图 11 所示。试验开始前将土槽中的杂草、茎秆、石块等捡除，然后整平、轻压，尽可能使土槽土壤符合田间作业情况，压实后的土壤坚实度为 8.27 kg/cm^2。



1. 从动件 2. 拉力传感器 3. 三相电机 4. 主动件 5. 变送器 6. 笔记本电脑 7. 串口 8. 齿条 9. 土槽 10. 滑切刀
1.Driven parts 2.Pull sensor 3.Three-phase motor 4.Driving parts 5.Transmitter 6.Laptop computer 7.Serial port 8.Rack 9.Soil tank 10.Sliding cutter

图 11　土槽试验平台
Fig.11　Soil tank test platform

2.4.2　试验原理

滑切刀作业阻力数据采集流程如图 12 所示。电机旋转带动主动件运动，主动件通过拉力传感器带动从动件运动进而使固定在从动件上的滑切刀进行作业，拉力传感器所检测到的主动件与从动件之间的牵引力即为滑切刀作业阻力。拉力传感器测试的数据经变送器 AD 转换为数字量并传输到计算机上。滑切刀作业速度通过调节变频器频率改变三相电机转速实现调整。

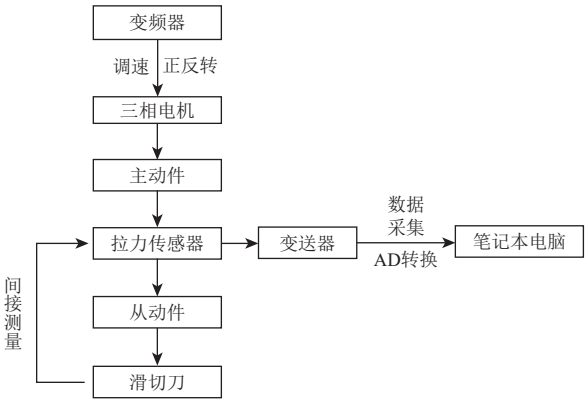


图 12　数据采集流程图
Fig.12　Data acquisition flow chart

2.5　试验结果与分析

滑切刀的作业速度、作业夹角、入土深度与仿真作业参数设置一致，同样进行 12 组交叉试验。由于土壤含水率较低，测试得到的滑切刀作业阻力整体小于仿真值，且经滑切刀作业后的土槽土壤单位面积紧实度难以保持一致，导致试验结果具有波动性，所以验证试验通过对比土槽试验各组最大阻力与仿真试验各组最大阻力进行分析。

土槽试验与仿真试验的各组最大阻力对比如图 13 所示。

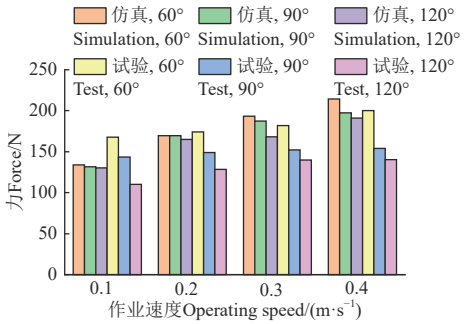


图 13　土槽试验结果对比分析图
Fig.13　Comparison analysis chart of soil tank test results

当作业速度为 0.1 m/s 时，滑切刀夹角在 60°、90°和 120°仿真试验中最大阻力值分别为 133.93、131.65 和 130.20 N，土槽试验最大阻力分别为 167.86、143.33 和 110.14 N，相对误差分别为 25.33%、8.87% 和 15.4%。当作业速度在 0.2、0.3 和 0.4 m/s 时，滑切刀夹角在 60°、90°和 120°仿真试验中最大阻力值分别为 169.49、169.34 和 164.86；193.15、187.39 和 168.12 N；214.29、197.66 和

191.06 N，土槽试验最大阻力分别为 174.11、149.10 和 128.42 N；181.80、151.98 和 139.96 N；200.08、153.91 和 140.44 N，其相对误差分别为 2.72%、11.95% 和 22.10%，5.88%、18.90% 和 16.75%，6.63%、22.13% 和 26.49%。

从上述分析结果可知，相同速度下，滑切刀夹角与作业阻力呈负相关；相同滑切刀角度下，滑切刀作业阻力与作业速度呈正相关。虽然土槽试验阻力值整体小于仿真试验阻力值，但两试验阻力变化规律一致，验证了离散元模型参数设置的可靠性。

3 缩短茎切割试验

滑切刀切割阻力反映了滑切刀作业性能的优劣，前文分析表明，滑切刀作业过程中受到的切削阻力与两滑切刀夹角相关。由切削理论可知切削阻力与切削速度相关。为防止滑切刀损伤疥瘤球，滑切刀并不是紧贴疥瘤球切割缩短茎，规定切割缩短茎处距离疥瘤球 0～20 mm 为合格，同时切割缩短茎不同位置处根茎大小不同导致的切削力也不同。因此，选择两滑切刀夹角，滑切刀作业速度和切割缩短茎位置到茎瘤芥的距离作为滑切刀切削阻力的影响因素。

3.1 单因素试验

滑切刀克服土壤阻力时的状态亦是切割青菜头缩短茎的状态，所以采用前述土壤-刀具相互作用参数，设置前进作业速度 0.1、0.2、0.3 和 0.4 m/s。两把滑切刀夹角设置为 60°、90°、120°和 150°。缩短茎切割距离设置为 0、10、20 和 30 mm。单因素试验时，设置前进速度 0.2 m/s，2 把滑切刀夹角 90°，缩短茎切割距离为 10 mm。试验材料均选用“涪杂 2 号”青菜头，缩短茎长势一致，长度大于 30 mm，如图 14 所示，单因素试验结果如表 4 所示。

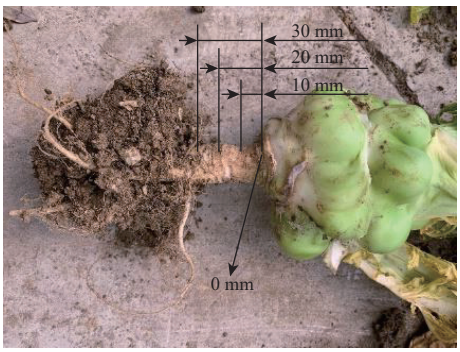


图 14 试验材料及切割位置示意图

Fig.14 Schematic diagram of test material and cutting position

由表 4 可知，滑切刀作业速度为 0.1 m/s 时切削阻力为 204.73 N，随着作业速度的逐步增加，切削阻力也随之增大，当作业速度达到 0.4 m/s 时切削阻力为 344.25 N；滑切刀夹角为 150°时，切削阻力最大，为 336.32 N，90°时切削阻力最小，为 261.19 N。夹角在 60°～120°时，滑切刀阻力从 290.83 N 减小到 261.19 N 再增大到 271.44 N，表明在 60°～120°之间存在一个最佳的夹角，可降低切削阻力；当切割距离为 0 时切削阻力为 299.65 N，切割距离越远，切削力越小，切割距离为 30 mm 时，切削阻力为 143.12 N。

表 4 单因素试验结果

Table 4 Results of single factor test

因素 Factors	数值 Values	切削阻力 Cutting resistance/N
作业速度 Operating speed/(m·s^{-1})	0.1	204.73
	0.2	243.44
	0.3	293.90
	0.4	344.25
滑切刀夹角 Sliding cutter angle/(°)	60	290.83
	90	261.19
	120	271.44
	150	336.32
切割距离 Cutting distance/mm	0	299.65
	10	238.37
	20	211.92
	30	143.12

3.2 Box-Behnken 试验

根据单因素试验结果，切削阻力随切割距离呈负相关，但为在合格范围之内切割缩短茎，切割距离选择在 0～20 mm，滑切刀作业速度 0.1～0.3 m/s，滑切刀夹角 60°～120°进行 Box-Behnken 试验。表 5 为因素水平表，切割试验如图 15 所示。

表 5 试验因素水平表

Table 5 Test factor level table

水平 Levels	作业速度 Operating speed A/(m·s^{-1})	滑切刀夹角 Sliding cutter angle B/(°)	切割距离 Cutting distance C/mm
1	0.1	60	0
2	0.2	90	10
3	0.3	120	20

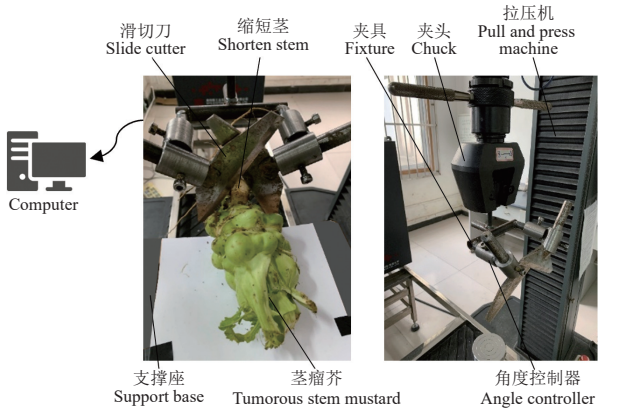


图 15 缩短茎切割试验

Fig.15 Shorten stem cutting test

拉压测试机夹住滑切刀夹具模拟滑切刀切割作业，利用计算机精确控制夹头速度，进而控制滑切刀的作业速度，夹头内置压力传感器在模拟切割作业过程中实时将压力数值传回给计算机，以作业过程中最大压力值作为滑切刀的切削阻力，两滑切刀夹角通过角度控制器进行改变，茎瘤芥平放在硬质支撑座上，当滑切刀将缩短茎完全切断则完成一次试验。

表 6 为 Box-Behnken 试验方案及结果，共 17 组试验，其中试验号 4、6、9、14、16 为中心对照组。

表 6　Box-Behnken 试验结果

Table 6　Box-Behnken test results

试验序号 Test No.	*a*	*b*	*c*	切削阻力 Cutting resistance/N
1	3	3	2	174.09
2	2	1	3	239.32
3	1	2	1	251.66
4	2	2	2	341.95
5	2	1	1	387.19
6	2	2	2	225.55
7	1	1	2	188.71
8	1	3	2	184.31
9	2	2	2	234.07
10	2	3	3	282.75
11	1	2	3	134.35
12	2	3	1	207.03
13	3	2	3	221.74
14	2	2	2	226.49
15	3	1	2	354.71
16	2	2	2	325.84
17	3	2	1	331.04
k_1	189.76	292.48	294.23	
k_2	274.47	254.74	250.64	
k_3	270.40	212.05	219.54	
e	84.71	80.43	74.69	
切削阻力均值 Average cutting resistance/N				253.58
主次因素 Primary and secondary factors		A，B，C		

注：*a*、*b*、*c* 为 *A*、*B*、*C* 的水平值，*e* 为 k_1、k_2、k_3 的极差。

Note: *a*, *b*, *c* are the level values of *A*, *B*, *C*, and *e* is the range of k_1, k_2, k_3.

由极差值 *e* 知道各因素对切削阻力大小影响主次顺序依次是滑切刀作业速度、滑切刀夹角、切割距离，17 组试验的平均切削阻力为 253.58 N。从表 7 方差分析结果可知，滑切刀作业速度和滑切刀夹角对切削阻力的回归模型显著且失拟项不显著，表明在该试验设计因素水平范围内，回归模型与真实情况之间存在较高的相关性。滑切刀切削阻力 *R* 回归方程为

$$R = 238.31 + 1\,704.81\,a - 0.27\,b - 20.90\,c$$
$$= 14.69\,ab + 2\,ac + 0.19\,bc \quad (18)$$

表 7　Box-Behnken 试验方差分析

Table 7　Box-Behnken test analysis of variance

来源 Source	平方和 Sunm of squares	自由度 Degrees of ferrdom	均方 Mean square	*F*	*P*
模型 Model	57 379.92	6	9 563.32	3.76	0.031 8*
a	13 004.81	1	13 004.81	5.12	0.047 2*
b	12 940.38	1	12 940.38	5.09	0.047 6*
c	11 157.19	1	11 157.19	4.39	0.062 6
ab	7 763.37	1	7 763.37	3.06	0.111 0
ac	16.04	1	16.04	6.313e-3	0.938 2
bc	12 498.12	1	12 498.12	4.92	0.050 9
残差	25 409.51	10	2 540.95		
失拟项	11 957.75	6	1 992.96	0.59	0.730 3
纯误差	13 451.75	4	3 362.94		
总计	82 789.43	16			

注：*表示该项显著（$P<0.05$）。

Note: * indicates that the item is significant($P<0.05$).

3.3　最佳参数试验

在正交旋转试验设计因素范围内，以最小切削阻力为优化目标，利用 Design-Expert 软件的优化功能选出的滑切刀切削阻力回归模型最佳参数组合为作业速度 0.1 m/s，滑切刀夹角 65.66°，切割距离 19.94 mm，理论切削阻力为 128.63 N。为方便试验将滑切刀夹角取整为 65°，切割距离取整为 20 mm。

滑切刀以作业速度 0.1 m/s，夹角 65°，切割距离 20 mm 重复 3 次切割试验，得到切削阻力依次为 141.24、156.32 和 150.65 N，与理论切削力相对误差分别为 9.8%、21.53% 和 17.12%，较 Box-Behnken 试验平均切削力分别下降 44.30%、38.35% 和 40.59%，优化后的试验切削阻力明显降低，研究结果可为青菜头收获机研制提供参考。

4　结　论

针对丘陵山区青菜头机械化收获缺失问题，根据青菜头种植农艺设计滑切式青菜头收获机，该机能够一次性完成对青菜头的切根、去叶和收集，并重点对其滑切刀作业参数进行分析与试验，主要结论如下：

1）标定了紫色土壤与滑切刀相互作用参数并基于 EDEM 建立了土壤-刀具互作阻力模型，探究了土壤与刀具的相互作用，根据离散元模型试验结果有，滑切刀完全入土后，相同速度下,滑切刀夹角与作业阻力呈负相关；相同滑切刀角度，滑切刀作业阻力与作业速度呈正相关，且该作业规律通过了土槽试验验证。

2）基于拉压测试机对滑切刀切割青菜头缩短茎切削阻力大小进行了切割试验，试验结果表明：滑切刀作业速度与切削阻力呈正相关，缩短茎切割距离与切削阻力呈负相关，滑切刀夹角从 60°到 120°时，切削阻力先减小再增大。影响切削阻力大小的主次顺序依次为滑切刀作业速度、滑切刀夹角和切割距离。

3）利用 Design-Expert 软件以最小切削阻力为优化目标，取整后的最佳参数组合为滑切刀作业速度 0.1 m/s，滑切刀夹角 65°，缩短茎切割位置 20 mm，理论切削力为 128.63 N。重复 3 次切割试验，结果表明：优化后的切削力分别为 141.24、156.32 和 150.65 N，与理论切削力相对误差分别为 9.8%、21.53% 和 17.12%，较 Box-Behnken 试验平均切削力分别下降 44.30%、38.35% 和 40.59%，验证了滑切刀作业参数优化的有效性，研究结果可为青菜头收获机研制提供参考。

[参　考　文　献]

[1] 陈德军. 产业链金融“链长制”试点的地方实践[J]. 中国金融，2022(23)：94-95.

[2] 潘超杰，王辉，金香凤，等. 青菜头收获机械化发展现状与展望[J]. 南方农机，2022，53(18)：29-31.

[3] 张涛，李英，宋树民，等. 基于柔性夹持的青菜头收获机设计与试验 [J]. 农业机械学报，2020，51(S2)：162-169，190.
ZHANG Tao, LI Ying, SONG Shumin, et al. Design and experiment of tumorous stem mustard harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 20, 51(S2): 162-169, 190. (in Chinese with English abstract)

[4] 龚境一，叶进，杨仕，等. 榨菜收获机的设计研究[J]. 农机化研究，2018，40(3)：120-124.
GONG Jingyi, YE Jin, YANG Shi, et al. Research and design of tumorous stem mustard harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(3): 120-124. (in Chinese with English abstract)

[5] 黎奎良，叶进，岳高峰，等. 青菜头收获机切割装置设计与试验研究[J]. 农机化研究，2019，41(12)：140-144.
LI Kuiliang, YE Jin, YUE Gaofeng, et al. Design and experimental study on cutting device of tumorous stem mustard harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(12): 140-144. (in Chinese with English abstract)

[6] 冯伟，李平，张先锋，等. 榨菜收获机割台结构设计与试验[J]. 南方农业，2018，12(34)：127-129,133.
FENG Wei, LI Ping, ZHANG Xianfeng, et al. Structural design and experiment of heading platform of tumorous stem mustard harvester[J]. Southern China Agriculture, 2018, 12(34): 127-129,133. (in Chinese with English abstract)

[7] 金月，肖宏儒，宋志禹，等. 手扶自走式青菜头联合收获机设计与试验[J]. 中国农机化学报，2020，41(11)：45-50.
JIN Yue, XIAO Hongru, SONG Zhiyu, et al. Design and experiment of self-propelled tumorous stem mustard harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(11): 45-50. (in Chinese with English abstract)

[8] 叶俊杰. 涪陵地区丘陵山地榨菜收获机设计与试验研究 [D]. 杭州：浙江农林大学，2021.
YE Junjie. Design and Experimental Study on Mustard Harvester in Hilly and Mountainous Areas of Fuling Area [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2021. (in Chinese with English abstract)

[9] 吴渭尧. 一种榨菜收割机：CN201410218522.9[P]. 2014-10-01.

[10] 吴渭尧. 榨菜收割机：CN201420266019.6[P]. 2014-10-08.

[11] 郝林杰，叶进，岳高峰，等. 青菜头缩短茎物理力学特性的试验研究[J]. 西南大学学报（自然科学版），2018，40(12)：30-36.
HAO Linjie, YE Jin, YUE Gaofeng, et al. A study of the physical and mechanical properties of the shortend stem of tumorous stem mustard[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2018, 40(12): 30-36. (in Chinese with English abstract)

[12] DIDAMONY M I E, SHAL A M E. Fabrication and evaluation of a cabbage harvester prototype[J]. Agriculture, 2020, 10(12): 1-11.

[13] KIM H J, CHOI Y S. Pulling performance of a self-propelled chinese cabbage harvester and design of a preprocessing unit[J]. Journal of Agriculture & Life Science, 2020, 54(1): 99-108.

[14] YASMEEN Z, ASHRAF M, AHMAD S, et al. Development and economic evaluation of carrot harvester cum trimmer[J]. Journal of Agriculture Engineering, 2023, 61(1): 65-76.

[15] 郝志豪，郑恩来，李勋，等. 免耕播种机旋耕刀耕作性能分析与结构优化[J]. 农业工程学报，2023，39(2)：1-13.
HAO Zhihao, ZHENG Enlai, LI Xun, et al. Performance analysis of the soil-contacting parts for no-tillage planters and optimization of blade structure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(2): 1-13. (in Chinese with English abstract)

[16] 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 Digging Mechanism Based on Discrete Element Method and Design of Bionic Shovel[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)

[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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(21): 54-59. (in Chinese with English abstract)

[18] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling of tillage: Determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. Biosystems Engineering, 2014, 121: 105-117.

[19] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage: Accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 298-306.

[20] UCGUL M, SAUNDERS C, FIELKE J M. Discrete element modelling of tillage forces and soil movement of a one-third scale mouldboard plough[J]. Biosystems Engineering, 2017, 155: 44-54.

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

[22] TONG Z, LI L, ZHANG X, et al. Design and experiment of the components for soil flow direction control of hilling machine based on EDEM[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(3): 122-131.

[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, LYU Jiangnan, et al. Calibration of simulation physical parameters of clay loam based on soil accumulation test[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(12): 116-123. (in Chinese with English abstract)

[24] 张学宁，尤泳，王德成，等. 基于离散元法的板结草地破土切根刀优化设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(11)：176-187.
ZHANG Xuening, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Design and experiment of soil-breaking and root-cutter based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 176-187. (in Chinese with English abstract)

[25] 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 with English abstract)

[26] 王宪良，钟晓康，耿元乐，等. 基于离散元非线性弹塑性接触模型的免耕土壤参数标定[J]. 农业工程学报，2021，37(23)：100-107.
WANG Xianliang, ZHONG Xiaokang, GENG Yuanle, et al.

Construction and parameter calibration of the nonlinear elastoplastic discrete element model for no-tillage soil compaction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(23): 100-107. (in Chinese with English abstract)

[27] 王学振，岳斌，高喜杰，等. 深松铲不同翼铲安装高度时土壤扰动行为仿真与试验[J]. 农业机械学报，2018，49(10)：124-136.

WANG Xuezhen, YUE Bin, GAO Xijie, et al. Discrete element simulations and experiments of disturbance behavior as affected by mounting height of subsoiler's wing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 124-136. (in Chinese with English abstract)

[28] FAN Y, ZHAO P, QIU L C, et al. Simulation analysis and experiment on performance of bionic potato digging shovel[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2019, 28(1): 206-216.

Development of the sliding cutter for the shortened stem of tumorous stem mustard

XIANG Wang[1,2], SUN Yuhua[1,2,3], LIU Fanyi[1,2,3], LI Mingsheng[1,2,3], XIE Shouyong[1,2,3※], KE Chao[1,2], HUANG Yao[1,2]

(1. *College of Engineering Technology*, *Southwest University*, *Chongqing* 400715, *China*; 2. *Southwest Agricultural Equipment Innovation Center*, *Chongqing* 400715, *China*; 3. *Chongqing Key Laboratory of Agricultural Equipment in Hilly and Mountainous Areas*, *Chongqing* 400715, *China*)

Abstract: *Brassica juncea var. tumida* (tumorous stem mustard, TSM) is one of the most important vegetable crops of the Brassica genus of the Cruciferae family. However, the low level of mechanized harvesting cannot fully meet the large-scale production in the TSM industry. There is a high demand to shorten the stem cutting for the better integration of agricultural machinery and agronomy in the process of mechanized harvesting of TSM. In this study, a sliding-cut TSM harvester was proposed to optimize the operating parameters of its sliding cutter. Firstly, the structure and working principle were elaborated for the TSM harvester and root-cutting device, according to the agronomic requirements of the TSM harvesting. The sliding cutting was analyzed to compare the current shortened stem reciprocating and rotary cutting of TSM. The shape and structural parameters were determined to ensure the working strength of the sliding cutter. The installation of the sliding cutter was clarified, according to the force analysis. The contact parameters were calibrated between purple soil and slide cutter in the southwestern region. A soil-sliding cutter interaction model was established using EDEM software. A simulation was then implemented to analyze the impact of different operating speeds and cutter angles on the working resistance of the sliding cutter. The results showed that the angle between the sliding cutter and the working resistance was negatively correlated at the same speed, whereas, the working resistance of the sliding cutter was positively correlated with the working speed at the same sliding cutter angle. The soil tank test was conducted to verify the reliability of the parameter setting in the discrete element model, indicating the better performance of the sliding cutter. The cutting test was also carried out to optimize the test parameters, with the cutting resistance as the evaluation index, and with the operating speed, the angle of the cutter, as well as the cutting distance as the influencing factors. The results showed that the operating speed of the sliding cutter was positively correlated with the cutting resistance, whereas, the cutting distance was negatively correlated with the cutting resistance. The cutting resistance first decreased and then increased, when the tool angle was from 60° to 120°. The influencing factor of cutting resistance was ranked in the order of importance: operating speed, tool angle, and cutting distance. Furthermore, the operating speed of the sliding cutter was 0.1 m/s, the included angle of the cutter was 65°, and the cutting distance was 20 mm after optimized rounding. The values of cutting force in three repeated tests were 141.24, 156.32 and 150.65 N, respectively, where the errors were 9.8%, 21.53%, and 17.12%, respectively, compared with the theoretical of 128.63 N. Those values were 44.30%, 38.35% and 40.59% lower than the average cutting force in the Box-Behnken test. The optimal parameters of sliding knife operation were also verified. The findings can provide a strong reference for the mechanized harvesting of TSM, indicating the important engineering application.

Keywords: agricultural machinery; experiments; discrete element; sliding cutter; soil tank test; tumorous stem mustard