

三七茎叶采收机仿生切割刀片设计与试验

郑嘉鑫^{1,2} 王世顺¹ 马 龙¹ 杨文彩^{1,2} 金智伟³ 严 毅³ 朱龙图^{1,2}

(1. 云南农业大学机电工程学院, 昆明 650500; 2. 云南高校高原特色现代农业装备工程研究中心, 昆明 650500;

3. 昆明市海口林场, 昆明 650114)

摘要: 针对传统三七茎叶采收机切割刀片在滑切减阻、刀片刃口锋利性等方面存在明显不足,以切叶蚁上颚结构特征为仿生原型,运用逆向工程技术,提取切叶蚁上颚轮廓曲线,分别基于切叶蚁的切齿齿顶尖锐端和上颚轮廓曲线设计了A、B两种不同的仿生切割刀片;开展了EDEM仿真与台架对比试验,仿真试验结果表明,仿生刀片A、B相较于传统刀片的平均最大剪切力分别降低7.74%和3.07%;台架试验结果表明,仿生刀片A、B相较于传统刀片的平均最大剪切力分别降低8.84%和2.53%,并且仿生刀片A、B在提高三七茎秆横切面平整度方面效果显著;3种刀片仿真试验与台架试验所测得的最大剪切力误差均不大于3.64%,仿真试验结果与实际试验结果基本一致。以刀型、切割倾角、切割速度为试验因素,开展正交试验,确定了较优参数组合为仿生刀片A、切割倾角0°、切割速度400 mm/min。基于较优参数组合开展田间试验,结果显示其对三七茎叶采收平均完整率为97.37%,较传统刀片提升2.01个百分点,平均漏割率为2.64%,较传统刀片降低1.46个百分点,表明以切叶蚁上颚切齿齿顶尖锐端为特征点设计的仿生刀片能够有效提升三七采收机作业性能。

关键词: 三七茎叶采收机; 切割刀片; 仿生; 切叶蚁

中图分类号: S225.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)08-0117-10

OSID:



Design and Experiment of Bionic Cutting Blades for *Panax notoginseng* Stem and Leaf Harvesting Machine

ZHENG Jiaxin^{1,2} WANG Shishun¹ MA Long¹ YANG Wencai^{1,2} JIN Zhiwei³ YAN Yi³ ZHU Longtu^{1,2}

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650500, China

2. Plateau-characteristic Modern Agricultural Equipment Engineering Research Center

for Colleges and Universities in Yunnan, Kunming 650500, China

3. Kunming Haikou Forest Farm, Kunming 650114, China)

Abstract: In response to the obvious shortcomings of traditional *Panax notoginseng* stem and leaf harvesting machine cutting blades in sliding cutting resistance reduction and blade edge sharpness, taking the upper jaw structure characteristics of leaf cutting ants as a biomimetic prototype, reverse engineering technology was used to extract the upper jaw contour curve of leaf cutting ants. Two different bionic cutting blades, A and B, were designed based on the sharp end of the cutting tooth tip and the upper jaw contour curve of leaf cutting ants; EDEM simulation and bench comparison experiments were conducted, and the simulation results showed that the average maximum shear forces of bionic blades A and B were reduced by 7.74% and 3.07% compared with that of traditional blades, respectively. The bench test results showed that the average maximum shear force of bionic blades A and B was reduced by 8.84% and 2.53% compared with that of traditional blades, respectively, and bionic blades A and B had a significant effect on improving the flatness of the transverse cutting surface of *Panax notoginseng* stem. The maximum shear force errors measured by the three blade simulation tests and bench tests were all not more than 3.64%, and the simulation test results were basically consistent with the actual test results. Using blade shape, cutting angle, and cutting speed as experimental factors, an orthogonal experiment

收稿日期: 2024-03-25 修回日期: 2024-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31260425)、云南省重大科技专项(202102AE090042-06-04、202102AA310048)和云南省基础研究专项(202401CF070071)

作者简介: 郑嘉鑫(1988—),女,副教授,博士,主要从事高原特色农业全程机械化等研究,E-mail: zhengjiaxin_0628@126.com

通信作者: 朱龙图(1988—),男,讲师,博士,主要从事农业智能装备研究,E-mail: zhult2020@163.com

was conducted to determine the optimal parameter combination as bionic blade A, cutting angle 0°, and cutting speed 400 mm/min. Based on the optimal parameter combination, field experiments were conducted, and the results showed that the average intact rate of harvesting *Panax notoginseng* stems and leaves was 97.37%, which was 2.01 percentage points higher than that of traditional blades. The average missed cutting rate was 2.64%, which was 1.46 percentage points lower than that of traditional blades. This indicated that the bionic blade designed with the sharp end of the cutting teeth on the upper jaw of the leaf cutting ant can effectively improve the operational performance of the *Panax notoginseng* harvester.

Key words: harvesting machine of *Panax notoginseng* stems and leaves; cutting blade; bionic; leaf cutting ant

0 引言

三七茎叶采收机是实现三七茎叶高效采收的重要装置,切割刀片是三七茎叶采收机的关键部件,其作业性能直接影响三七茎秆切割质量^[1-2]。目前国内在三七收获机及其相关技术装备研发方面取得了一定的成果。张兆国团队对三七收获机进行了较深入研究,设计了包括分段牵引式三七收获机、悬挂式三七挖掘收获机、自走式三七收获机以及温室三七收获机等机型^[3-6]。曹钦洲^[7]对三七联合收获机的输送提升装置进行了设计与试验,并确定了其最佳工作参数。王一驰^[8]基于野猪鼻结构曲线,设计了一款三七根茎仿生挖掘铲。邓寓轩^[9]对自走式三七联合收获机底盘及动力传动系统进行设计,利用相似理论量纲分析法验证了其设计的合理性。三七茎叶采收同样是三七收获的重要部分,然而目前针对三七茎叶采收机的研究较少。三七茎秆质地坚硬、韧性大,传统三七茎叶采收机的切割刀片在滑切减阻、刀片刃口锋利性等方面存在明显不足。

仿生学在农业机械领域中应用较广,对于农业机械装备关键部件性能改善有较大作用^[10]。以昆虫上颚、口器等特征部位为仿生原型对切割刀片进行优化设计,已经成为农业机械作业效率提升的重要途径^[11-17]。虽然仿生刀片在一些粮食作物和经济作物上有不少应用研究,但关于提升三七茎秆切割效率的仿生刀片却鲜有研究报道^[18]。

切叶蚁在剪切作物茎叶方面效果显著,其通过上颚的振动与滑切作用^[19-20],完成对作物茎叶的高效切割。因此,本文以切叶蚁上颚作为仿生研究对象,通过 Matlab、Origin 软件分析其上颚结构,利用逆向工程技术,提取其上颚轮廓曲线,为提升仿生刀片切割性能,分别基于滑切效果突出的上颚切齿齿顶尖锐端和上颚轮廓曲线设计两种不同的仿生刀片;以最大剪切力、横切面平整度为试验指标,开展 EDEM 仿真与台架对比试验,测试不同刀片的减阻、切割性能;通过正交试验确定刀片主要影响因素的

较优参数组合;并以三七茎叶采收完整率和漏割率为试验指标,基于较优参数组合开展田间试验,测试刀片作业性能。

1 切叶蚁上颚特征提取

1.1 切叶蚁上颚结构特征分析

切叶蚁上颚结构如图 1a 所示,其依靠上颚的振动与滑切作用实现高效茎叶剪切。本文从实验室培养的切叶蚁蚁群中随机选取 10 只成虫作为样本进行分析。提取切叶蚁上颚样品,将其置于体视显微镜下观察,观察到的切叶蚁口器上颚如图 1b 所示。切叶蚁上颚轮廓为弧形齿状结构,各齿尖锐端主要起滑切作用^[21-22]。

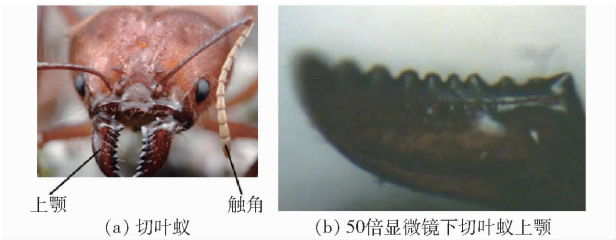


图 1 切叶蚁上颚

Fig.1 Upper jaw of leaf cutting ant

1.2 切叶蚁上颚轮廓提取

截取切叶蚁上颚轮廓如图 2a 所示,对其进行坐标定位,x 轴最大值限定为 1 000 mm,y 轴最大值限定为 250 mm,采用逆向工程技术提取上颚齿形轮廓曲线。常用的轮廓提取方法有边缘检测法和二值化法^[23-24]。边缘检测是通过 Sobel、Laplacian 和 Canny 等算子的选用来实现边缘检测及轮廓转换。二值化法则是利用 Rgb2gra、Im2bw 等函数将图像转换为二值图像,再利用 Imdilate 和 Edge 函数实现形态学操作和边界检测,进而完成轮廓提取。鉴于边缘检测法受算子选取的影响较大,本文基于 Matlab 软件,利用二值化法提取切叶蚁上颚轮廓。具体应用操作过程为:先应用 Matlab 软件中的高斯滤波命令对上颚图像进行降噪处理,用以增强图像的原始特征;然后分别使用 Rgb2gra 函数和 Im2bw 函数对

滤波后图像进行灰度化和二值化处理,使图像所有黑色像素点集合在上颚边缘处,增强边缘特征;之后通过 Im dilate 函数和 Edge 函数实现图像的膨胀填充及边缘提取,确保图像轮廓曲线清晰完整。

将提取的轮廓图像导入到 Origin 软件,并对图像轮廓进行离散取点,提取了 59 个点,如图 2b 所示。

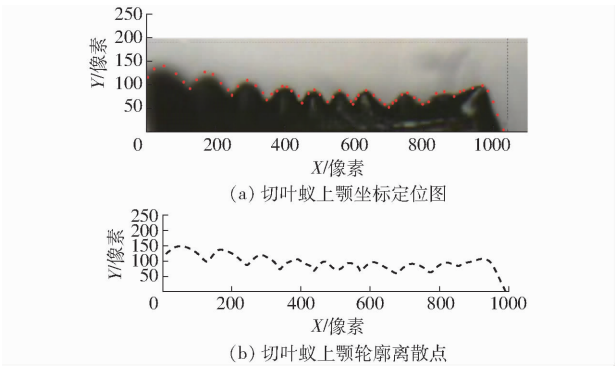


图 2 切叶蚁上颚轮廓提取

Fig. 2 Extracting contour of upper jaw of leaf cutting ants

表 1 切叶蚁上颚提取主要特征点坐标

Tab.1 Extracting main feature points coordinate from upper jaw of leaf cutting ants											像素
坐标	仿生特征点序号										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
x	55.041 63	167.089 33	283.677 31	380.644 78	468.856 00	537.608 86	610.739 84	724.246 92	825.916 83	930.505 49	
y	149.077 71	136.204 95	118.155 09	105.282 32	97.586 64	97.586 64	96.327 35	91.150 26	93.808 76	106.541 41	

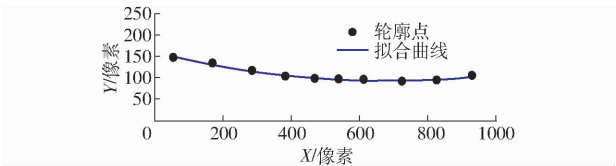


图 3 仿生特征点拟合曲线

Fig. 3 Bionic feature point fitting curve

满足设计要求。

结合图 4 所示的传统刀片结构尺寸,以上述拟合曲线为刃口曲线,按照比例 1:20 对刃口曲线进行放大处理,使之满足刀片刃口长度需求,设计如图 5 所示的仿生刀片 A。

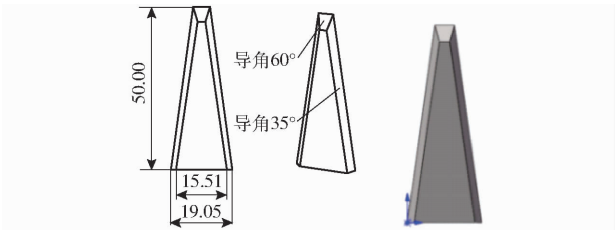


图 4 传统刀片二维图和三维图

Fig. 4 2D and 3D images of prototype blades

2.2 仿生刀片 B 设计

基于切叶蚁上颚切齿轮廓曲线开展仿生刀片 B 设计。切叶蚁成虫一般具有 10 个上颚切齿(如

2 仿生刀片设计

为提高三七茎叶采收机切割刀片滑切效果、选择适宜的切割刀片,本文结合三七茎叶采收机传统刀片的结构尺寸,基于切叶蚁的切齿齿顶尖锐端和上颚轮廓曲线分别设计了 A、B 两种不同的仿生切割刀片。

2.1 仿生刀片 A 设计

切叶蚁成虫上颚一般具有 10 个切齿,鉴于其切齿齿顶尖锐端以滑切运动为主,本文以切叶蚁上颚切齿齿顶尖锐端为特征点开展仿生刀片 A 设计,提取的 10 个仿生特征点对应的坐标如表 1 所示。

利用多项式对上述 10 个仿生特征点进行拟合,得到滑切曲线的拟合方程

y = 1.554 2x² - 0.208 6x + 163.117 4 (1)

式中 x——像素数

对应的拟合曲线如图 3 所示,其 R² 为 0.982 5,

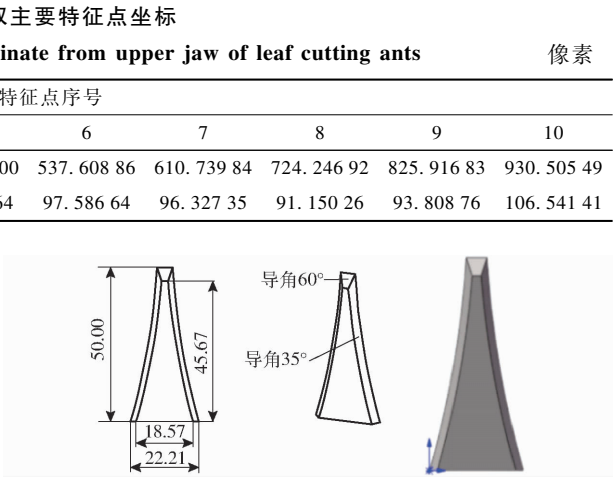


图 5 仿生刀片 A 二维图和三维图

Fig. 5 2D and 3D images of bionic blade A

图 2a 所示),为选取滑切效果突出的切齿轮廓曲线,依据 10 个切齿轮廓位置将前文提取的 59 个离散数据点按图 6 所示划分为 10 部分,每部分数据点均用光滑曲线依次连接,可构成 10 段不同的曲线。

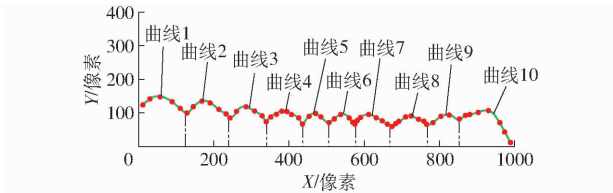


图 6 提取后的轮廓曲线划分结果

Fig. 6 Result of contour curve division after extraction

为获取滑切效果较好的仿生曲线,分别对这 10 段曲线进行拟合与曲率分析。拟合操作基于 Origin 软件,四次多项式拟合方程为

F(x) = A₀ + A₁x + A₂x² + A₃x³ + A₄x⁴ (2)

式中 A_0 ——截距 A_1 ——一次项系数 A_2 ——二次项系数 A_3 ——三次项系数 A_4 ——四次项系数

结果如表 2 所示。表中结果显示,所有拟合曲线的 R^2 均大于 0.97,拟合度较高。

表 2 拟合曲线参数

Tab.2 Fitting curve parameters

参数	曲线 1	曲线 2	曲线 3	曲线 4	曲线 5	曲线 6	曲线 7	曲线 8	曲线 9	曲线 10
A_0	108.736 2	520.755 0	-2 449.903 4	2 572.327 8	680 375.406 8	1 056 577.265	-22 042.899 0	687 383.389 8	2 893 902.600 5	546 292.307 8
A_0 标准差	0.457 2	1 079.749 0	13 904.845 4	48 349.713 8	0	224 256.135 1	105 408.711 8	431 175.055 0	0	509 640.189 2
A_1	1.744 7	-15.685 7	23.670 9	-29.877 2	-5 878.945 4	-7 813.036 4	63.047 0	-3 836.683 8	-14 261.504 8	-2 337.683 6
A_1 标准差	0.047 5	24.619 1	194.677 5	505.775 8	0	1 663.062 4	677.320 0	2 401.701 9	0	2 220.278 8
A_2	-0.019 8	0.176 8	-0.075 0	0.119 5	19.009 8	21.628 8	0.028 3	8.013 3	26.333	3.735 5
A_2 标准差	0.001 4	0.206 9	1.017 5	1.979 2	0	4.621 6	1.630 5	5.013 5	0	3.624 2
A_3	1.236 9	-7.708 3	9.601 1	-1.894 9	-0.007 3	-0.026 6	-2.108 0	-0.007 4	-0.021 5	-0.002 6
A_3 标准差	1.527 1	7.602 3	0.002 35	0.003 4	0	0.005 7	0.001 7	0.004 6	0	0.002 6
A_4	2.434 1	1.145 8	-4.728 2	9.723 8	1.462 8	1.221 2	1.517 1	2.572 1	66 328	6.962 4
A_4 标准差	5.516 2	1.031 2	2.031 6	2.228 5	0	2.638 1	6.978 7	1.615 1	0	7.134 2
R^2	0.999	0.991	0.994	0.970 2	1	0.998	0.996	0.981	1	0.989

对各拟合曲线进行曲率求解,结果如图 7 所示。从图 7 中可看出,只有曲线 6 的曲率接近 0.2,其余曲线曲率均小于 0.1,曲线 6 弯曲程度最大,其波峰更尖锐,有利于滑切运动,因此本文以拟合曲线 6 作为仿生刀片 B 刃口曲线,对应刃口曲线方程为

$$y = 1.221\,24x^4 - 0.026\,63x^3 + 21.628\,82x^2 - 7\,813.036\,4x - 1\,056\,577.26$$

(3)

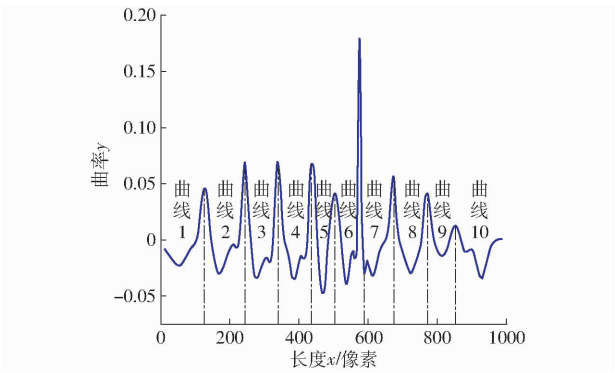


图 7 曲率变化曲线

Fig.7 Curvature variation curve

在图 4 所示传统刀片结构上,以拟合曲线 6 作为刃口曲线,以满足刀片刃口长度需求的比例 1:20 实现刃口曲线放大处理,在 Solidworks 软件中以传统刀片刃口曲线为阵列方向做阵列处理,设计如图 8 所示的仿生刀片 B。

依据三七茎叶采收机对刀片的加工尺寸及工艺需求,分别加工了传统刀片、仿生刀片 A 和仿生刀片 B,并使三者厚度均为 2.5 mm。为便于刀片安装固定,依据机具安装卡槽结构尺寸,设计了各刀片底部固装尺寸及安装孔径,各刀片底部宽度、高度及安装孔径分别为 75、45、10 mm。3 种刀片制造材料均为 65Mn 钢,加工时对各刀片刃口进行淬火、回火等



图 8 仿生刀片 B 二维图和三维图

Fig.8 2D and 3D images of bionic blade B

热处理,以保证其切割锋利度和强度。刀片加工实物如图 9 所示。

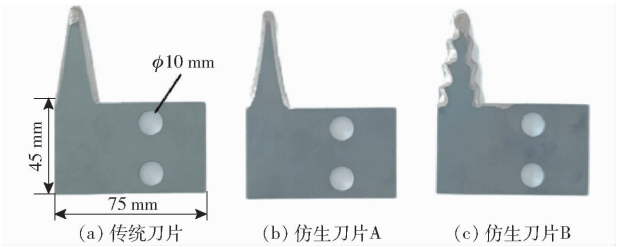


图 9 刀片台架试验实物图

Fig.9 Physical images of blades in bench test

3 EDEM 仿真与台架切割性能对比试验

为对比分析仿生刀片 A、仿生刀片 B 和传统刀片的减阻、切割性能,分别开展仿真试验与台架试验。

3.1 EDEM 仿真试验

3.1.1 仿真模型构建

根据前期预试验测定可知,三七茎秆内部为纤维化组织和大量水分,对力学性能起到决定作用的是三七茎秆外皮层,三七茎秆细小,故在建模时默认茎秆为各向同性的材料;三七茎秆剪切模型采用 Hertz - Mindlin with bonding 模型,该模型在三七茎秆中相邻颗粒间形成粘结键,在剪切仿真中利用粘

结键的断裂来模拟三七茎秆剪切过程^[25-27]。以种植两年期三七植株茎秆为参照原型,三七茎秆仿真模型直径设置为 3.5 mm,对应长度设置为 60 mm,并选用半径为 0.5 mm 的颗粒进行填充,其它离散元参数设置如表 3^[28-29]和表 4^[30]所示,得到如图 10a 所示的三维模型。

表 3 三七茎秆离散元参数

Tab.3 Discrete element parameters of <i>Panax notoginseng</i> stem	
参数	数值
泊松比	0.40
剪切模量/Pa	5.92×10^8
密度/(g·cm ⁻³)	1.25
颗粒 Bonding 键连接半径/mm	0.50
单位面积法向刚度/(N·m ⁻³)	$9.60 \times 10^{6[28]}$
单位面积切向刚度/(N·m ⁻³)	$6.80 \times 10^{6[28]}$
临界法向应力/Pa	$8.72 \times 10^{6[28]}$
临界切向应力/Pa	$7.50 \times 10^{6[28]}$
茎秆-茎秆碰撞恢复系数	0.55 ^[28]
茎秆-茎秆静摩擦因数	0.782
茎秆-茎秆动摩擦因数	0.352
茎秆-刀片碰撞恢复系数	0.5 ^[28-29]
茎秆-刀片静摩擦因数	0.758
茎秆-刀片动摩擦因数	0.286

表 4 65Mn 钢物理参数

Tab.4 Physical parameters of 65Mn steel	
参数	数值
泊松比	0.30
剪切模量/Pa	8.19×10^{10}
密度/(g·m ⁻³)	7.85×10^3
弹性模量/Pa	2.11×10^{11}
屈服强度/Pa	4.30×10^8

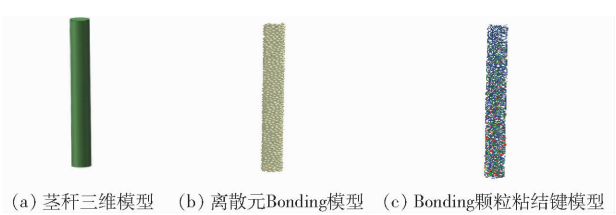


Fig. 10 *Panax notoginseng* stem model

将三七茎秆三维模型导入 EDEM 软件,利用 EDEM 软件生成三七茎秆离散元 Bonding 颗粒模型,如图 10b 所示,Bonding 颗粒模型之间的粘结键如图 10c 所示,三七茎秆填充颗粒数为 1 117,粘结键生成总数为 2 394,粘结键失效数为 2,粘结键有效率为 99.92%,构建的三七茎秆离散元分析模型符合仿真试验需求。

3.1.2 仿真试验过程

利用 Solidworks 绘图软件建立 3 种刀片装配体

三维模型后导入 EDEM 软件,3 种刀片仿真试验模型如图 11 所示,为有效切断三七茎秆,设置刀片与三七茎秆距离为 0.5 mm,运动时间为 0.1 s,仿真运行步长为 1.125×10^{-7} s,切割倾角为 0°(即刀片平面与三七茎秆水平横切面的夹角为 0°),各刀片分别在移动速度 350、400、450 mm/min 下开展仿真试验,并记录每组试验刀片切割过程中的剪切力变化情况,同时获取对应的最大剪切力。

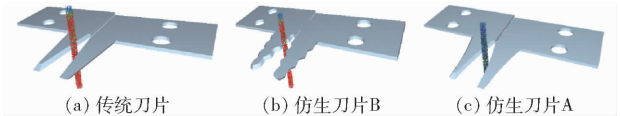


图 11 3 种刀片仿真试验模型

Fig. 11 Three blade simulation test models

3.1.3 仿真试验结果与分析

通过 EDEM 软件后处理功能,得到 3 种刀片剪切三七茎秆情况如图 12 所示,三七茎秆剪切力随时间变化曲线如图 13 所示。

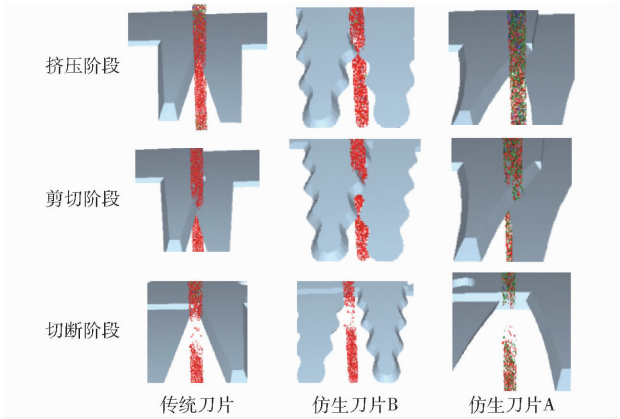


图 12 不同类型刀片剪切茎秆对比

Fig. 12 Comparison of different types of blade cutting stems

由图 12 可知,刀片在剪切三七茎秆时主要分为 3 个阶段:挤压阶段、剪切阶段、切断阶段。挤压阶段主要表现为刀片持续压缩剪切三七茎秆,剪切力开始急剧增大,该阶段刀片压缩作用力超过茎秆抵抗强度导致三七茎秆破裂;剪切阶段为刀片持续剪切三七茎秆的一个过程,该阶段刀片对三七茎秆的剪切力会继续上升,在切断三七茎秆瞬时剪切力出现最大值,随后剪切力急剧降低,然后趋于平稳;切断阶段为三七茎秆剪切力不断降低至零。

三七茎秆在不同切割阶段,其组织结构破坏趋势均是由外向内扩散。传统刀片、仿生刀片 A、仿生刀片 B 在切割过程中对三七茎秆模型造成的粘结键断裂数量分别为 492、454、462,仿生刀片 A 切割三七茎秆模型断裂的粘结键数量最少,并且仿生刀片 A、仿生刀片 B 相较于传统刀片造成粘结键断裂数量分别降低 4.02%、3.14%。剪切过程中,三七茎秆模型粘结键的断裂是由刀片剪切造成的,粘结

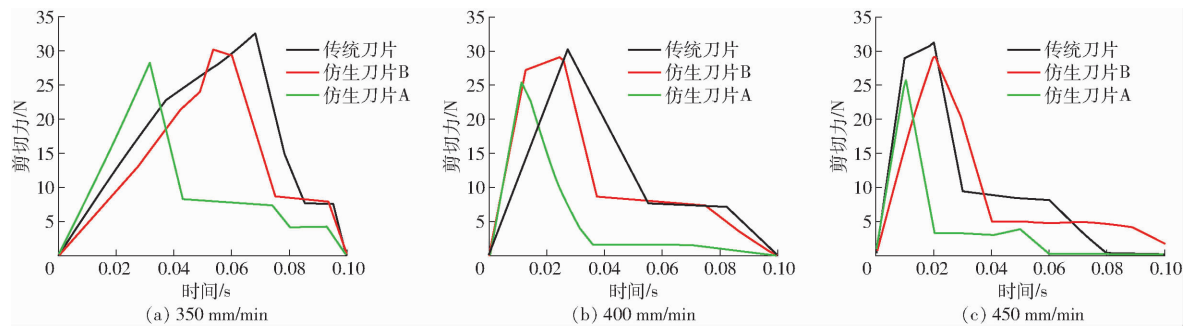


图 13 不同移动速度下仿真剪切力变化曲线

Fig. 13 Simulated shear force variation curves at different movement speeds

键断裂数量越少,刀片产生的平均剪切力越小。仿生刀片 A、仿生刀片 B 平均剪切力为 13.88、15.04 N,相较于传统刀片平均剪切力 16.12 N,分别降低 7.46%、3.46%,表明仿生刀片 A、仿生刀片 B 切割减阻性能均优于传统刀片。

从图 13 可以看出,当移动速度相同时,各刀片最大剪切力由小到大顺序为:仿生刀片 A、仿生刀片 B、传统刀片;随着速度增大,刀片对三七茎秆的剪切力出现峰值的时间变短。

3.2 台架试验

3.2.1 试验设备与材料

试验材料为昆明市海口林场林下种植两年期的三七植株。由于三七茎秆实际剪切采收多以距地面高度 40~80 mm 为宜,故选取距地面高度 60 mm 处的三七茎秆作为试验材料,茎秆直径基本一致,测得其平均直径为 3.5 mm,平均含水率为 82.36%。三七茎秆切割试验台架由试验刀片、刀片夹具、固定销钉、三七茎秆及万能试验机等组成,如图 14 所示。试验在三七茎秆样本采集完成后 12 h 内进行。

3.2.2 试验设计与方法

试验时将传统刀片、仿生刀片 A 和仿生刀片 B 分别加装于万能试验机夹具上,并使刀片切割倾角为 0°,由万能试验机带动刀片向下运动。各刀片分别在移动速度 350、400、450 mm/min 下开展试验,记录每组试验刀片切割三七茎秆过程中的剪切力变化情况,获取刀片对茎秆的最大剪切力,每组试验重复

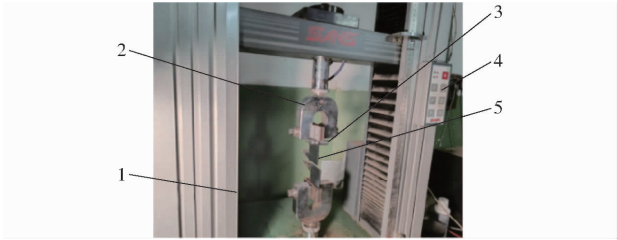


图 14 试验台架

Fig. 14 Test bench

1. 万能试验机 2. 刀片夹具 3. 固定销钉 4. 操作器 5. 刀片

5 次,取平均值。同时,观察试验后三七茎秆断口横切面平整度情况。

3.2.3 台架试验结果与分析

通过万能试验机配套软件 MaxTest 输出三七茎秆剪切力随位移变化曲线,如图 15 所示。图中给出了多次测量的误差线,各刀片 5 次重复试验的相对误差均不超过 4.62%,误差主要来源可能是三七茎秆样本之间的细微差异造成的。

从图 15 可以看出,当移动速度相同时,各刀片最大剪切力由小到大顺序同样为:仿生刀片 A、仿生刀片 B、传统刀片,与仿真试验相符。

3 种刀片剪切三七茎秆横切面如图 16 所示。通过三七茎秆横切面可知,仿生刀片 A 产生的三七茎秆横切面光滑,仅有少量毛刺;仿生刀片 B 产生的三七茎秆横切面较为光滑,但是有较少毛刺;传统刀片产生的三七茎秆横切面毛刺较多,并导致三七茎秆有较小的破裂现象。说明仿生刀片 A、B 在提

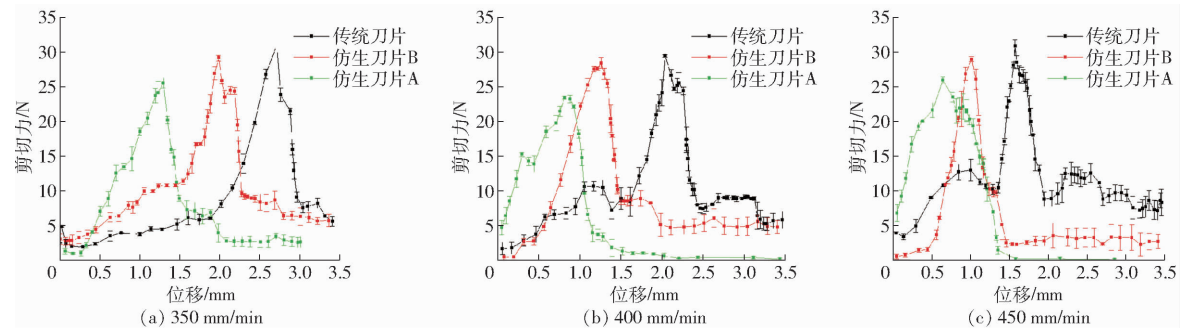


图 15 台架试验剪切力变化曲线

Fig. 15 Shear force change curves of bench tests

高三七茎秆横切面平整度方面效果显著。

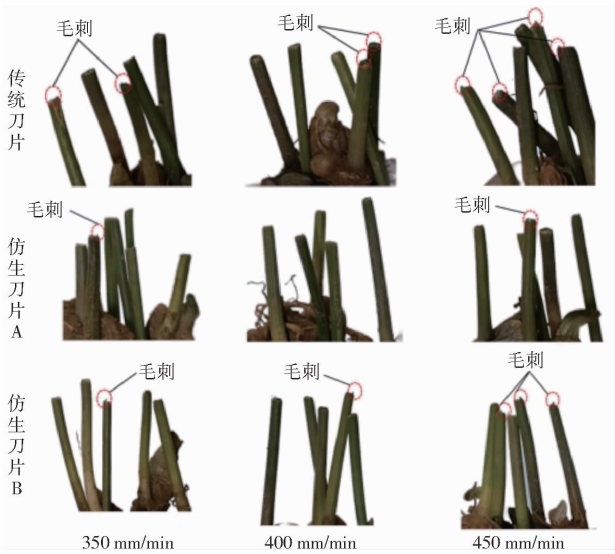


图 16 台架试验三七茎秆横切面对比

Fig. 16 Comparison of stem sections of *Panax notoginseng* in bench tests

3.3 仿真与台架试验结果对比

以最大剪切力为分析指标,仿真与台架对比试验结果如表 5 所示。

表 5 仿真与台架对比试验结果

Tab.5 Comparison between simulation and bench testing				
类型	移动速度/ (mm·min ⁻¹)	仿真试验最 大剪切力 F_s /N	台架试验最 大剪切力 F_t /N	误差 Δ / %
传统刀片	350	32.86	31.24	2.53
	400	30.12	29.73	0.65
	450	32.68	31.02	2.61
	平均值	31.89	30.66	1.97
仿生刀片 A	350	28.44	26.44	3.64
	400	26.15	24.48	3.30
	450	27.32	26.12	2.25
	平均值	27.30	25.68	3.06
仿生刀片 B	350	30.42	29.66	1.26
	400	29.40	28.65	1.29
	450	30.14	29.14	1.69
	平均值	29.98	29.15	1.40

仿真试验结果表明,传统刀片、仿生刀片 A、仿生刀片 B 在不同移动速度下的平均最大剪切力分别为 31.89、27.30、29.98 N,仿生刀片 A 所需最大剪切力最小,并且仿生刀片 A、仿生刀片 B 相较于传统刀片的平均最大剪切力分别降低 7.74% 和 3.07%。台架试验结果显示,传统刀片、仿生刀片 A、仿生刀片 B 在不同移动速度下的平均最大剪切力分别为 30.66、25.68、29.15 N,仿生刀片 A 所需最大剪切力同样是最小的,且仿生刀片 A、仿生刀片 B 相较于传统刀片的平均最大剪切力分别降低

8.84% 和 2.53%。传统刀片、仿生刀片 A、仿生刀片 B 仿真试验与台架试验所测得的最大剪切力误差均不大于 3.64%,仿真试验结果与实际试验结果基本一致,表明试验结果可靠。

4 正交试验

4.1 试验设计

刀片作业时切割倾角、切割速度是影响三七茎秆切割效果的主要因素^[31]。为获得不同刀片切割倾角及切割速度的较优参数组合,以刀片类型、切割倾角和切割速度为试验因素,以刀片最大剪切力为试验指标进行三因素三水平正交试验。试验在图 14 所示万能试验机台架上开展。

试验材料与台架试验保持一致,切割倾角是指三七茎秆水平横切面与刀片平面之间的夹角,可通过改变刀片夹具位置来调节切割倾角大小,根据预试验确定切割倾角范围为 $-5^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 。试验因素水平如表 6 所示。每组试验重复 5 次,记录茎秆最大剪切力,结果取平均值。

表 6 台架试验因素水平

Tab.6 Level of factors in bench testing			
水平	因素		
	刀型	切割倾角/(°)	切割速度/(mm·min ⁻¹)
1	传统刀片	-5	350
2	仿生刀片 B	0	400
3	仿生刀片 A	5	450

4.2 正交试验结果与分析

对正交试验结果进行极差分析,其结果如表 7 所示(M 、 N 、 P 为因素水平值),可以得知各因素对最大剪切力的影响由大到小为 M 、 N 、 P ,优方案为 $M_3N_2P_2$,即刀片类型为仿生刀片 A、切割倾角为 0° 、切割速度为 400 mm/min。以该优方案进行台架试验验证,试验重复 3 次,结果为 24.12、23.86、24.34 N,求得最大剪切力平均值为 24.11 N,该结果优于表 7 中结果。

5 田间试验

5.1 试验条件与方法

田间试验场地为云南农业大学试验田,试验平台为自走式三七茎叶采收机,将仿生刀片 A 安装在如图 17 所示的自走式三七茎叶采收机上,在正交试验所确定的较优参数组合条件下开展田间试验,以茎叶漏割率和完整率为评价指标,试验重复 5 次,求取平均值。同时,将仿生刀片 A 作业效果与传统刀片作业效果进行对比,用以验证仿生刀片 A 作业性

表 7 正交试验结果与极差分析

Tab.7 Orthogonal experimental results and range analysis

实验号	M	N	P	Q(空 白组)	最大剪切 力/N
1	1	1	1	1	33.44
2	1	2	2	2	29.60
3	1	3	3	3	31.72
4	2	1	2	3	30.80
5	2	2	3	1	29.20
6	2	3	1	2	30.00
7	3	1	3	2	29.60
8	3	2	1	3	26.00
9	3	3	2	1	25.60
k_1	31.59	31.28	29.81	29.41	
k_2	30.00	28.27	28.67	29.73	
k_3	27.07	29.11	30.17	29.51	
极差 R	4.52	3.01	1.50	0.32	
较优方案	M_3	N_2	P_2		

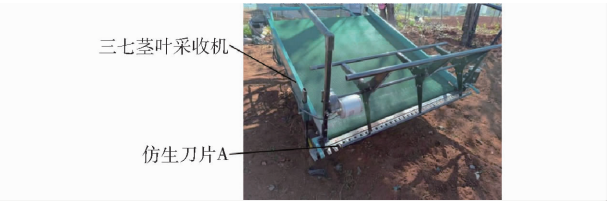


图 17 自走式三七茎叶采收机

Fig.17 Self moving *Panax notoginseng* stem and leaf harvester

能。其中,三七茎叶采收完整率计算式^[32-33]为

$$m = \frac{m_a}{m_b} \times 100\%$$

(4)

式中 m ——采收范围内三七茎叶完整率, %

m_a ——采收范围内完整三七茎叶质量, g

m_b ——采收范围内所得三七茎叶总质量, g

三七茎叶漏割率计算式为

$$n = \frac{n_w}{n_t} \times 100\%$$

(5)

式中 n ——采收范围内三七茎叶漏割率, %

n_w ——采收范围内漏割的三七茎叶质量, g

n_t ——采收范围内三七茎叶总质量, g

5.2 试验结果与分析

田间试验结果如表 8 所示,采用仿生刀片 A 开展田间采收作业时三七茎叶采收的平均完整率为 97.37%,较传统刀片提升 2.01 个百分点,平均漏割率为 2.64%,较传统刀片降低 1.46 个百分点,表明

以切叶蚁上颚切齿齿顶尖锐端为特征点设计的仿生刀片能够有效提升三七采收机作业性能,满足设计要求。

表 8 田间试验结果

Tab.8 Field test results

刀型	序号	完整率/ %	平均完整 率/%	漏割率/ %	平均漏割 率/%
传统刀片	1	94.65		3.48	
	2	95.26		4.24	
	3	94.88	95.36	4.58	4.10
	4	96.12		3.78	
	5	95.88		4.44	
仿生刀片 A	1	97.48		2.03	
	2	96.44		2.56	
	3	96.86	97.37	3.12	2.64
	4	97.96		2.44	
	5	98.12		3.04	

6 结论

(1)以切叶蚁上颚结构特征为仿生原型,分别基于切叶蚁的切齿齿顶尖锐端和上颚轮廓曲线设计了 A、B 两种不同的三七茎叶采收仿生切割刀片,开展了 EDEM 仿真与台架对比试验,仿真试验结果表明,仿生刀片 A、B 相较于传统刀片的最大剪切力分别降低 7.74% 和 3.07%。台架试验结果表明,仿生刀片 A、B 相较于传统刀片的最大剪切力分别降低 8.84% 和 2.53%,并且仿生刀片 A、B 在提高三七茎秆横切面平整度方面效果显著;3 种刀片仿真试验与台架试验所测得的最大剪切力误差均不大于 3.64%,仿真试验结果与实际试验结果基本一致,试验结果可靠。

(2)以刀型、切割倾角、切割速度为试验因素,基于万能试验机开展了正交试验,确定较优参数组合为仿生刀片 A、切割倾角 0°、切割速度 400 mm/min,在较优参数组合下三七茎秆最大剪切力为 24.11 N。

(3)基于正交试验确定的较优参数组合开展田间试验,结果显示其对三七茎叶采收平均完整率为 97.37%,较传统刀片提升 2.01 个百分点,平均漏割率为 2.64%,较传统刀片降低 1.46 个百分点,表明以切叶蚁上颚切齿齿顶尖锐端为特征点设计的仿生刀片能够有效提升三七采收机作业性能。

参 考 文 献

[1] 赵明岩,翟晓东,林敏.黑鱼整皮剥离系统切割刀具工作参数优化与试验[J].农业工程学报,2023,39(5):249-255.
ZHAO Mingyan, ZHAI Xiaodong, LIN Min. Optimization and test of the working parameters of the cutting disc for the whole-skin peeling system of snakehead[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(5): 249-255. (in Chinese)

[2] 石萍萍,潘俊,李宏,等.三七茎叶研究进展[J].药学研究,2022,41(1):57-63.

- SHI Pingping, PAN Jun, LI Hong, et al. Research advance on the stems and leaves of *Panax notoginseng*[J]. Pharmaceutical Research, 2022, 41(1): 57–63. (in Chinese)
- [3] 张兆国,邓寓轩,王法安,等.自走式三七联合收获机底盘通过性能分析与模型试验[J].农业机械学报,2023,54(9):164–177.
ZHANG Zhaoguo, DENG Yuxuan, WANG Faan, et al. Traffic ability analysis and scaling model experiment of self-propelled *Panax notoginseng* combine harvester chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 164–177. (in Chinese)
- [4] 张兆国,王一驰,李汉青,等.液压控制履带自走式温室三七收获机设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(6):127–135,158.
ZHANG Zhaoguo, WANG Yichi, LI Hanqing, et al. Design and test of hydraulic control tracked self-propelled greenhouse *Panax notoginseng* harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 127–135, 158. (in Chinese)
- [5] 崔振猛,张兆国,王法安,等.振动式三七根土分离装置的运动学分析及优化设计[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(11):146–154.
CUI Zhenmeng, ZHANG Zhaoguo, WANG Faan, et al. Kinematic analysis and optimization design of a vibration-type device for *Panax notoginseng* root-soil separation[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2018, 46(11): 146–154. (in Chinese)
- [6] 张兆国,王法安,张永成,等.自走式三七收获机设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(增刊):234–240.
ZHANG Zhaoguo, WANG Fa'an, ZHANG Yongcheng, et al. Design and experiment of a self-propelled *Panax notoginseng* harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 234–240. (in Chinese)
- [7] 曹钦洲.三七联合收获机关键工作部件的设计与试验[D].昆明:昆明理工大学,2023.
CAO Qinzhou. Design and experiment of key working parts of *Panax notoginseng* combine harvester[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [8] 王一驰.基于离散元法的三七挖掘机理研究[D].昆明:昆明理工大学,2021.
WANG Yichi. Study on mining mechanism of *Panax notoginseng* based on discrete element method[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [9] 邓寓轩.自走式三七联合收获机底盘设计与通过性能模型试验[D].昆明:昆明理工大学,2023.
DENG Yuxuan. Chassis design and trafficability model test of self-propelled *Panax notoginseng* combine harvester[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [10] 贾洪雷,郭明卓,郭春江,等.免耕播种机动态仿生破茬装置设计与参数试验优化[J].农业机械学报,2018,49(10):103–114.
JIA Honglei, GUO Mingzhuo, GUO Chunjiang, et al. Design of dynamic bionic stubble cutting device and optimization test of parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 103–114. (in Chinese)
- [11] 许顺.长足大象甲的特征、力学、运动特征及其仿生分析[D].长春:吉林大学,2017.
XU Shun. Characteristic, mechanics, movement of cyrtotrachelus *Bugueti guer* and bionic analysis[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [12] 蒋锐,陈阳,于成信,等.仿蟋蟀切齿叶减阻灭茬刀片设计与试验[J].工程设计学报,2018,25(4):409–419.
JIANG Rui, CHEN Yang, YU Chengxin, et al. Design and experiment of cricket's incisor lobe inspired stubble cutting blade with drag reduction[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2018, 25(4): 409–419. (in Chinese)
- [13] 曾成,梁栋,张喜瑞,等.基于螳螂前足的香蕉纤维提取刀片仿生设计[J].农机化研究,2018,40(3):79–83.
ZENG Cheng, LIANG Dong, ZHANG Xirui, et al. The bionic design of the blade on the banana fiber extraction based on the structure of mantis's foreleg[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(3): 79–83. (in Chinese)
- [14] 陆锦.联合收获机秸秆切碎装置的仿生刀片的设计及试验研究[D].镇江:江苏大学,2022.
LU Jin. Design and experimental study of bionic knives for the straw chopping device of combined harvester[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)
- [15] 田昆鹏,李显旺,沈成,等.天牛仿生大麻收割机切割刀片设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(5):56–61.
TIAN Kunpeng, LI Xianwang, SHEN Cheng, et al. Design and test of cutting blade of cannabis harvester based on longicorn bionic principle[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 56–61. (in Chinese)
- [16] 李常营.留高茬式玉米收获机切割部件的仿生设计及其切割机理[D].长春:吉林大学,2014.
LI Changying. Bionicblade of corn harvester for leaving high stubble and its hutting mechanism[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [17] 邹宇.基于玉米芯轴还田腐解的粉碎关键部件仿生技术研究[D].长春:吉林大学,2023.
ZOU Yu. Research on bionic technology of key components for chopping based on corn cob field decomposition[D]. Changchun: Jilin University, 2023. (in Chinese)
- [18] 张兆国,徐红伟,薛浩田,等.三七茎秆离散元参数标定与试验[J].农业机械学报,2023,54(11):61–70,91.
ZHANG Zhaoguo, XU Hongwei, XUE Haotian, et al. Calibration and experiment of discrete element parameters of *Panax notoginseng* stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 61–70, 91. (in Chinese)

- [19] YAO G, FENG L, ZHANG D Y, et al. Morphology and mechanical properties of vibratory organs in the leaf-cutting ant (*Atta cephalotes*) [J]. Journal of Bionic Engineering, 2018, 15(4): 722–730.
- [20] SCHOFIELD R M S, EMMETT K D, NIEBALA J C, et al. Leaf-cutter ants with worn mandibles cut half as fast, spend twice the energy, and tend to carry instead of cut [J]. Behavioral Ecology and Sociobiology, 2011, 65(5): 969–982.
- [21] 张黎骅, 罗惠中, 周杨, 等. 青贮玉米切叶蚁上颚仿生粉碎刀片设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(12): 48–56.
ZHANG Lihua, LUO Huizhong, ZHOU Yang, et al. Design and test of bionic crushing blade based on the mandible of the leaf-cutter ant for harvesting silage maize [J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(12): 48–56. (in Chinese)
- [22] GARRETT R W, CARLSON K A, GOGGANS M S, et al. Leaf processing behaviour in *atta* leaf cutter ants: 90% of leaf cutting takes place inside the nest, and ants select pieces that require less cutting [J]. Royal Society Open Science, 2016, 3(1): 150111.
- [23] 宫金良, 王祥祥, 张彦斐, 等. 基于边缘检测和区域定位的玉米根茎导航线提取方法 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 26–33.
GONG Jinliang, WANG Xiangxiang, ZHANG Yanfei, et al. Extraction method of corn rhizome navigation lines based on edge detection and area localization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 26–33. (in Chinese)
- [24] 秦宽, 郎旭涛, 沈周高, 等. 茶园仿生往复开沟松土机设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 29–39.
QIN Kuan, LANG Xutao, SHEN Zhougao, et al. Design and experiment of reciprocating furrowing and loosening machine for tea garden [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 29–39. (in Chinese)
- [25] 熊平原, 杨洲, 孙志全, 等. 基于离散元法的旋耕刀三向工作阻力仿真分析与试验 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 113–121.
XIONG Pingyuan, YANG Zhou, SUN Zhiqian, et al. Simulation analysis and experiment for three-axis working resistances of rotary blade based on discrete element method [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 113–121. (in Chinese)
- [26] 宋少龙, 汤辉辉, 郑炫, 等. 新疆棉田耕后土壤模型离散元参数标定 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 63–70.
SONG Shaolong, TANG Zhihui, ZHENG Xuan, et al. Calibration of the discrete element parameters for the soil model of cotton field after plowing in Xinjiang of China [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 63–70. (in Chinese)
- [27] 朱惠斌, 钱诚, 白丽珍, 等. 基于 Plackett–Burman 试验设计与响应面法优化玉米秸秆离散元模型 [J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(12): 221–231.
ZHU Huibin, QIAN Cheng, BAI Lizhen, et al. Optimization of discrete element model of corn stalk based on Plackett–Burman design and response surface methodology [J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(12): 221–231. (in Chinese)
- [28] 张兆国, 薛浩田, 王一驰, 等. 基于离散元法的三七仿生挖掘铲设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 100–111.
ZHANG Zhaoquo, XUE Haotian, WANG Yichi, et al. Design and experiment of *Panax notoginseng* bionic excavating shovel based on EDEM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 100–111. (in Chinese)
- [29] 李俊伟, 佟金, 胡斌, 等. 不同含水率黏重黑土与触土部件互作的离散元仿真参数标定 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 130–140.
LI Junwei, TONG Jin, HU Bin, et al. Calibration of parameters of interaction between clayey black soil with different moisture content and soil-engaging component in northeast China [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6): 130–140. (in Chinese)
- [30] 张博文, 李爱潮, 郑志安, 等. 川麦冬往复切割式剪果装置设计与仿真试验 [J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 2): 81–90.
ZHANG Bowen, LI Aichao, ZHENG Zhian, et al. Design and simulation experiments of reciprocating cutting tuber removal device for *Ophiopogon japonicus* [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 81–90. (in Chinese)
- [31] 王佳, 李绍波, 陈春皓, 等. 葡萄茎秆切割装置作业参数优化与试验 [J]. 中国农机化学报, 2023, 44(2): 37–45.
WANG Jia, LI Shaobo, CHEN Chunhao, et al. Optimization and test of operating parameters of grape stem cutting device [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(2): 37–45. (in Chinese)
- [32] 杜哲, 胡永光, 王升. 便携式采茶机切割器运动仿真与试验 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 221–226.
DU Zhe, HU Yongguang, WANG Sheng. Simulation and experiment of reciprocating cutter kinematic of portable tea picking machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 221–226. (in Chinese)
- [33] DU Zhe, LI Denghui, JI Jiangtao, et al. Bionic optimization design and experiment of reciprocating cutting system on single-row tea harvester [J]. Agronomy, 2022, 12(6): 1309.