

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.21.017

基于鼯鼠爪趾仿生的茶园旋耕刀减阻设计与试验

郑书河^{1,2} 黄伟良^{1,2} 张博昱¹ 谭宇豪^{1,2} 秦 宽³ 任金波^{1,2}

(1. 福建农林大学机电工程学院, 福州 350100; 2. 现代农业装备福建省高校工程研究中心, 福州 350002;
3. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036)

摘要: 针对南方丘陵山地茶园旋耕整地作业阻力大、能耗高等问题,基于仿生鼯鼠前足物理特征对丘陵山区茶园旋耕刀进行减阻设计。利用逆向工程技术提取了鼯鼠前足中间3个趾(第2、3、4趾)的尖端轮廓和侧向轮廓特征,运用高斯方程和五阶多项式方程进行曲线拟合(决定系数大于等于0.998 6,误差平方和小于等于0.008 5),进行楔形简化处理和齿形排布优化。根据拟合结果设计了3种仿生齿形旋耕刀(A、B、C型),在EDEM 2023离散元软件上建立了刀具-土壤互作仿真试验模型,得出不同参数条件下传统刀具和3种仿生刀具的平均扭矩和碎土率。并结合台架和田间试验进行了多工况性能验证,试验中前进速度为0.5 m/s,旋耕深度为120 mm,刀轴转速分别设置为150、200、250 r/min。仿真结果表明,3种仿生刀具相较于传统刀具平均扭矩分别降低6.40%、3.73%、5.08%,碎土率分别提升7.09、8.82、4.68个百分点,其中A型刀具减阻效果最优,B型刀具碎土性能最佳。台架试验结果表明,3种仿生刀具相较于传统刀具平均扭矩分别降低7.25%、4.01%、5.49%。田间试验结果表明仿生刀具A、B、C平均碎土率分别为91.68%、92.84%、89.86%,相较于传统刀具碎土率分别提升了5.39、6.55、3.57个百分点。

关键词: 茶园旋耕刀; 仿生; 鼯鼠爪趾; 减阻设计

中图分类号: S222.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)21-0179-11 OSID: 

Design and Experiment of Bionic Drag-reducing Rotary Blade for Tea Gardens Based on Mole Claw Toes

Zheng Shuhe^{1,2} Huang Weiliang^{1,2} Zhang Boyu¹ Tan Yuhao^{1,2} Qin Kuan³ Ren Jinbo^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350100, China
2. Modern Agricultural Equipment Fujian University Engineering Research Center, Fuzhou 350002, China
3. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: Aiming to address the issues of high resistance and energy consumption during rotary tillage in tea gardens of southern hilly and mountainous areas, a drag-reducing design for a ditching blade was developed based on the bionic physical characteristics of mole forefeet. Reverse engineering technology was employed to extract the tip and lateral contour features of the middle three toes (the 2nd, 3rd, and 4th toes) of the mole forefoot. Gaussian equation and the fifth-order polynomial equation were used for curve fitting ($R^2 \geq 0.998\ 6$, $SSE \leq 0.008\ 5$), followed by wedge simplification and tooth arrangement optimization. Based on the fitting results, three types of bionic toothed rotary blades (types A, B, and C) were designed. A tool-soil interaction simulation model was established in the EDEM 2023 discrete element software, and the average torque and soil fragmentation rate of the conventional blade and the three bionic rotary tiller blades under different parameter conditions were obtained. Multi-condition performance verification was further carried out via bench tests and field experiments, in which the forward speed was 0.5 m/s, the rotary tillage depth was 120 mm, and the blade shaft rotational speeds were set to be 150 r/min, 200 r/min, and 250 r/min, respectively. Simulation results showed that the average torques of the three bionic rotary tiller were reduced by 6.40%, 3.73% and 5.08% compared with that of the conventional rotary tiller blade, and the soil breaking rates were increased by 7.09, 8.82 and 4.68 percentage points, respectively. The optimal drag reduction performance was obtained for type

A bionic rotary tiller blade, and the best soil crushing capacity was achieved by type B bionic rotary tiller blade. Bench test results indicated that the average torques of the three bionic rotary tiller blades were decreased by 7.25%, 4.01% and 5.49% in comparison with the traditional cutter. Field test results demonstrated that the average soil breaking rates of bionic rotary tiller blades A, B and C were measured as 91.68%, 92.84% and 89.86%, which were improved by 5.39, 6.55 and 3.57 percentage points relative to that of the traditional cutter.

Key words: tea garden rotary blade; bionic; mole claw toe; drag reduction design

0 引言

旋耕是茶园施肥前的关键环节,其作业质量与效率直接影响土壤的物理性状及后续施肥质量,进而影响茶树吸收肥力状况。旋耕刀作为旋耕机的核心工作部件,其结构性能直接决定了作业阻力、能耗、碎土效果以及土壤扰动情况。我国南方丘陵山地众多,多数茶园位于丘陵山区,其土壤黏性、容重和抗剪切强度与北方常见的黑壤土板结有显著差异。如北方典型的黑壤土在 0~20 cm 含水率为 20.82%、土壤容重均值为 1.04 g/cm³,土壤坚实度为 950 kPa^[1]。而南方丘陵山区茶园土壤类型以黄壤为主,属于壤质黏土,如武夷山市茶园土壤在 0~20 cm 时含水率为 23.59%,土壤容重均值为 1.13 g/cm^{3[2-3]},在 0~30 cm 坚实度为 1 890 kPa^[4],因其土壤黏粒较高,在高温高湿气候下,有机质分解快,淋溶作用强,更易形成深层、坚硬的物理性板结。传统刀具在板结严重的丘陵山区茶园复杂土壤环境作业时,普遍存在阻力大、能耗高、易粘土、碎土不均匀等问题,增加了农业生产成本,同时制约了耕作质量的进一步提升^[5-7]。因此,开展适用于丘陵山区茶园的低功耗、高性能旋耕刀具研究,对于提升茶园耕作效率、降低能耗具有重要的理论意义与应用价值。

现有旋耕刀减阻性能研究逐渐向仿生设计发展,为农业机械中的触土部件优化设计提供了新的研究思路和有效方法^[8-10]。Qin 等^[11]以河豚皮肤表面凸起结构设计仿生旋耕刀,单因素土壤箱试验表明配备仿生刀的旋耕机在功耗上降低 9.4%,地表平整度提高 6.5%。Li 等^[12]基于旱獭爪趾的仿生学原理,设计的新型旋耕刀作业能耗显著降低 12.85%;肖茂华等^[13]将东方蝾螈前足爪趾轮廓特征排列于 IT245 国标旋耕刀的正切刀,采取离散元仿真与土槽试验分析对比,结果表明:在 150~250 r/min 转速下,仿生刀水平与垂直阻力最大降幅达 9.91%和 9.74%,平均扭矩最大降低 10.53%,有效实现减阻。程慧^[14]以中华鲟鱼为仿生原型,利用其流线型身体结构和低阻力特性将其应用于旋耕刀具的刀尖和侧切刀的优化设计,能够以较少的能耗

完成相同的旋耕作业。Zhang 等^[15]提出了一种新型的仿穿山甲鳞片结构,设计的旋耕刀片相较于传统刀片破土效果降低 9.95%,但减阻效果提高了 18.81%。Yang 等^[16]通过对鼯鼠前爪趾的组合特征分析设计仿生旋耕刀,通过田间试验验证,仿生旋耕刀的功耗明显降低。然而,现有旋耕刀仿生多采用多爪趾组合轮廓直接映射,仅对尖端轮廓进行简单仿生,未区分单趾形态差异与力学贡献,且由于南方茶园土壤含水率高、土壤容重大,现有仿生刀具在作业过程中容易存在塞土和塞草现象,当填塞量较多时仿生结构特征对旋耕机的减阻降耗效果不明显。因此,本文基于鼯鼠前足中间三趾的单趾结构特征,开展仿生刀具的结构设计、构型优化、减阻降耗机理及耕作性能试验研究,探讨基于仿生学的刀具优化在南方山地茶园中的适用性,以期为丘陵山区茶园旋耕刀具高效节能耕作提供理论依据和实践借鉴。

1 仿生刀具设计

1.1 鼯鼠前足特征提取

鼯鼠标本如图 1a 所示,为精确还原鼯鼠爪趾结构参数,采用逆向工程设计方法获取鼯鼠前足爪趾尖端以及背部、腹部中轴线轮廓的点云数据。使用 3D 数字化测量设备(海克斯康手持式三维激光扫描仪)测量鼯鼠前足爪趾点云数据,通过 Imageware 13.2 对扫描后的点云图进行对齐、去噪、精简处理和特征提取,图 1b 所示为爪趾重构图。



图 1 鼯鼠前足重构图

Fig. 1 Reconstruction of mole forefoot

文献[17]指出鼯鼠前足中间 3 趾的长度、宽度、厚度等明显大于第 1、第 5 爪趾,是主要的挖掘工具。因此,采用锐化方法提取鼯鼠中间 3 趾尖端轮廓,并通过交互式点云截取侧面轮廓,将获取的点

云数据导入 AutoCAD 2020 软件,得到爪趾尖端及背部中轴线轮廓曲线的 X 、 Y 坐标值。将二维坐标数据导入 Matlab 2022 软件,基于最小二乘法分别对鼯鼠 2、3、4 爪趾尖端轮廓及侧向上下轮廓进行拟合,

得到的拟合曲线如图 2、3 所示。其中,尖端轮廓采用高斯方程、侧面轮廓采用五阶多项式方程进行拟合,拟合系数如表 1、2 所示。

爪趾 2、3、4 的尖端轮廓高斯方程为

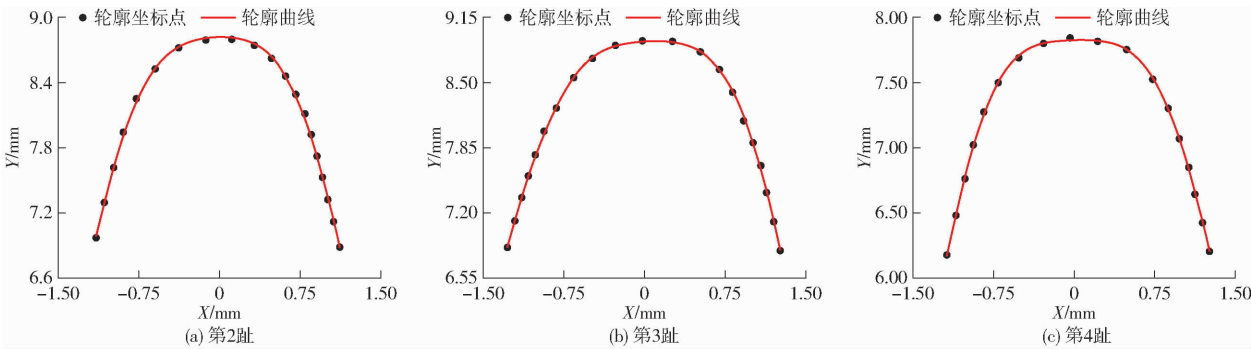


图 2 鼯鼠爪趾尖端轮廓拟合曲线

Fig. 2 Contour fitting curves of mole claw toe tip

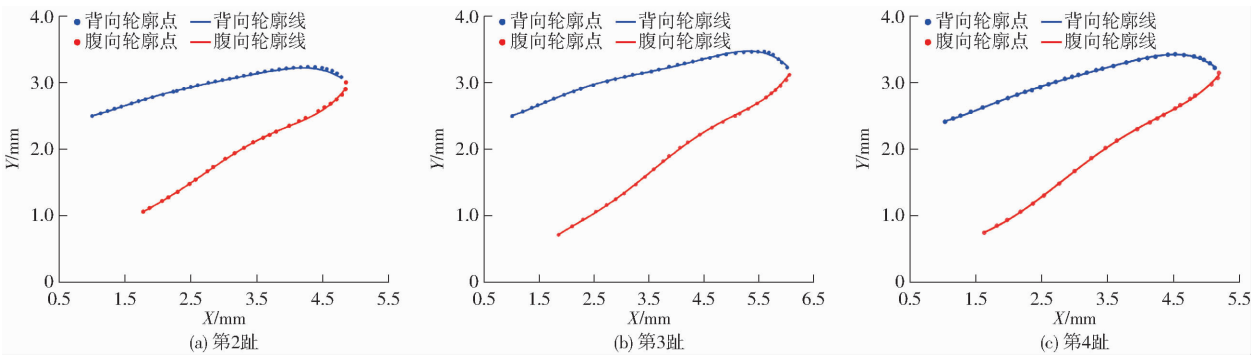


图 3 鼯鼠爪趾侧面背向、腹向轮廓拟合曲线

Fig. 3 Contour fitting curves of dorsal and ventral profiles of mole toes

表 1 鼯鼠前足爪趾尖端轮廓拟合曲线方程系数

Tab.1 Equation coefficients of contour fitting curves for toe tips of mole forelimb claws

系数	第 2 趾	第 3 趾	第 4 趾
a_1	7.042 6	5.068 5	6.899 4
b_1	0.773 0	1.047 1	0.779 2
c_1	1.131 5	1.036 6	1.345 8
a_2	7.155 1	8.224 6	5.651 9
b_2	-0.810 4	-0.602 7	-0.916 4
c_2	1.155 0	1.558 1	1.118 0
误差平方和	0.005 0	0.007 1	0.003 2
决定系数	0.999 4	0.999 3	0.999 4
校正决定系数	0.999 1	0.999 0	0.999 1
均方根误差	0.015 8	0.018 4	0.013 3

$$y=a_1e^{-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2}+a_2e^{-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2}\tag{1}$$

爪趾 2、3、4 的侧面轮廓五阶多项式方程为

$$y=p_1x^5+p_2x^4+p_3x^3+p_4x^2+p_5x+p_6\tag{2}$$

1.2 旋耕刀切削刃优化

旋耕刀主要有弯形刀、直角刀、凿形刀等,弯形旋耕刀应用最为广泛,结构上包含正切面、侧切面、正切刃、侧切刃,正切刃和侧切刃统称为切削刃。在工作时,侧切刃和正切刃先后切入土壤,对土壤进行

切削、抛甩,完成旋耕作业。

根据国家标准 GB/T 5669—2008《旋耕机械 刀和刀座》,选取 II T245 型刀座式旋耕刀,刀辊回转半径 245 mm,刀柄宽度 30 mm,工作宽幅 60 mm,在此国标刀座式旋耕刀毛坯的基础上进行仿生设计。

对刀具切削部件截面进行仿生简化:将爪趾侧面轮廓简化为楔形结构,利用 Matlab 2022 软件对爪趾背部中轴线轮廓拟合曲线进行曲率分析,得到如图 4 所示的曲率分布图。以第 3 趾背部轮廓为例,简化后的轮廓曲线如图 5 所示。

从图 4 中可知,拟合曲线曲率总体呈波状纹变化,具有多个波峰和波谷,这一形态特征表明,爪趾轮廓并非简单平滑的弧形,而是通过一系列交替的曲率变化来优化挖土过程中的力学性能。如图 5 所示, bc 段(爪趾前端)曲率总体较大,构成了爪趾主要弯曲切削刃口, ab 段(爪趾后端)曲率变化平缓。这一形态特征使得爪趾在入土时,前端完成对土壤快速切入与破碎,后端提供稳定支撑。 d 、 e 、 f 分别为 a 、 b 、 c 的垂足点,点 b 为拐点,线段 ab 与 df 的夹角为拐角 α_1 , bc 与 df 的夹角为刃口角 α_2 ,利用 Matlab 导出各个线段的尺寸以及相关夹角,如表 3 所示。

表 2 鼹鼠前足爪趾侧面轮廓拟合曲线方程系数

Tab.2 Equation coefficients of lateral contour fitting curves for toe tips of mole forelimb claws

系数	第 2 趾		第 3 趾		第 4 趾	
	背向轮廓	腹向轮廓	背向轮廓	腹向轮廓	背向轮廓	腹向轮廓
p_1	-0.009 1	0.022 8	-0.004 6	0.009 9	-0.007 8	0.009 0
p_2	0.116 8	-0.318 5	0.071 7	-0.178 3	0.106 7	-0.119 0
p_3	-0.572 8	1.676 4	-0.412 9	1.214 3	-0.564 1	0.540 1
p_4	1.298 4	-4.133 4	1.054 2	-3.879 4	1.394 2	-0.902 9
p_5	-1.052 2	5.356 0	-0.873 2	6.350 6	-1.234 0	0.817 3
p_6	2.724 8	-2.036 7	2.673 9	-3.565 3	2.718 9	0.220 4
误差平方和	0.001 0	0.008 5	0.004 0	0.002 0	0.001 3	0.003 4
决定系数	0.999 4	0.999 0	0.998 6	0.999 9	0.999 6	0.999 7
校正决定系数	0.999 3	0.998 8	0.998 4	0.999 8	0.999 5	0.999 6
均方根误差	0.005 4	0.018 1	0.010 9	0.008 7	0.006 5	0.012 3

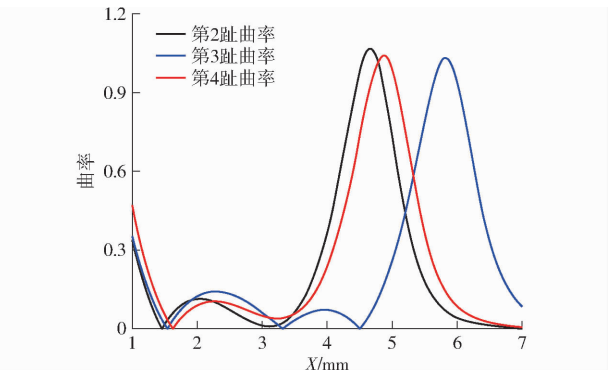


图 4 背向轮廓拟合曲线曲率

Fig.4 Curvature of back contour fitting curves

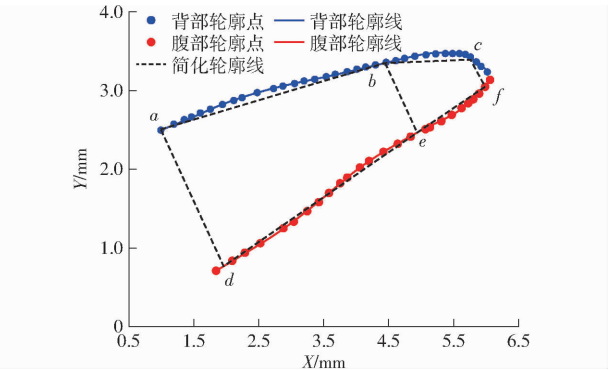


图 5 第 3 趾侧面轮廓简化图

Fig.5 Simplified profile of the third toe

表 3 爪趾简化参数

Tab.3 Simplified dimensional parameters of forelimb claws

参数	爪趾序号		
	2	3	4
l_{ab}/mm	2.19	3.54	2.38
l_{ad}/mm	1.62	1.98	1.74
l_{bc}/mm	1.56	1.34	1.66
l_{be}/mm	1.04	1.04	1.12
l_{cf}/mm	0.33	0.43	0.36
l_{df}/mm	3.51	4.60	3.77
拐角 $\alpha_1/(\text{^\circ})$	15.36	15.55	15.03
刃口角 $\alpha_2/(\text{^\circ})$	26.92	27.16	27.25

传统刀具正切面侧面宽度 3.5 ~ 5.0 mm, 刃口厚度为 1 ~ 2 mm, 刃口角 20° ~ 45°。根据旋耕刀标准以及仿生设计比例法, 后端厚度即线段 ad 长度 l_{ad} 应与旋耕刀正切面侧面宽度一致, 对爪趾侧向尺寸参数进行放大, 放大倍数分别为 3.09、2.53、2.87。

借助 ANSYS/LS—DYNA 显式动力学研究原爪趾轮廓与简化后结构的应力动态变化^[18], 数值仿真过程中选择软件自带的土壤材料模型 * MAT_147 (* MAT_FHWA_SOIL), 忽略内部作用力, 将土壤近似处理为各向同性材料。将原轮廓和简化后结构建模后将文件以 *.x_t 格式导入到 ANSYS/LS—DYNA 中, 利用材料库对模型材料属性设置为 65Mn 钢, 密度 $7.865 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 210 GPa, 泊松比 0.3, 土壤网格大小为 1 mm, 仿生齿网格大小为 0.8 mm。网格划分后对土壤模型施加约束与载荷以模拟实际入土状态, 将接触特性设为侵蚀接触, 图 6 所示为仿生齿有限元仿真结果。

由图 6 可得第 2 爪趾仿生齿简化前后的应力分布大致相同, 且最大应力都集中在齿前端, 简化前后等效应力分别为 285.95、269.95 MPa, 误差为 5.60%, 两者最大等效应力均小于 65Mn 钢的屈服强度 (430 MPa), 其余两趾简化前后应力分布也具有一致性。

根据放大后的尺寸参数在 Solidworks 中放样生成旋耕刀切削部侧向轮廓, 尖端轮廓采取方程驱动式生成, 由文献[1]可知相邻两个爪趾间距与趾宽最优比值为 1.25, 故在旋耕刀切削刃部位沿边线生成 9 个齿形轮廓, 仿生刀具结构示意图如图 7 所示。将仿生对象为爪趾 2、3、4 的旋耕刀记为仿生刀具 A、B、C, 加工完成的实物图如图 8 所示。图 7 中 O 为回转中心; R_0 为侧切刃起始半径; R_1 为侧切刃终点半径; R 为刀辊回转半径; α 为刃口角; l_1 为截取的刀

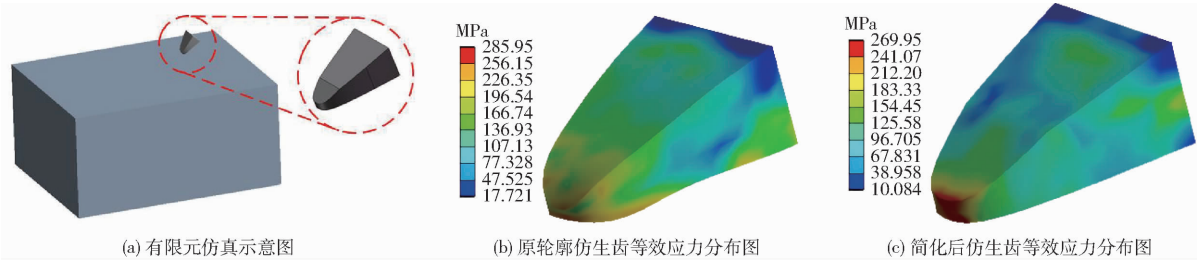


图 6 仿生齿有限元仿真结果

Fig. 6 Finite element simulation results of bionic tooth

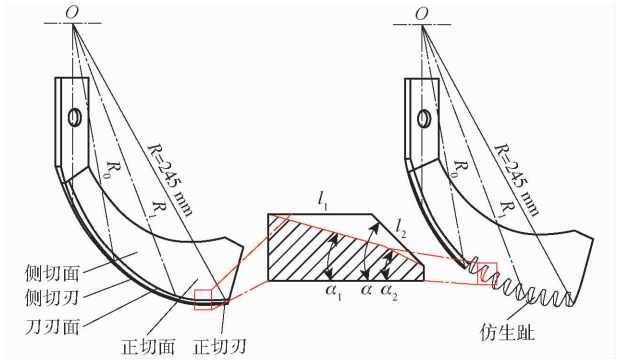


图 7 仿生刀具结构示意图

Fig. 7 Schematic of bionic rotary tiller blade

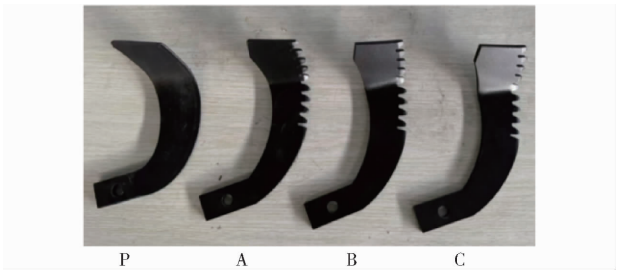


图 8 仿生刀具实物图

Fig. 8 Physical photo of bionic rotary tiller blade

身正面长度; l_2 为刃面宽度。

1.3 旋耕刀减阻机理分析

1.3.1 切削刃横截面受力分析

仿生齿形旋耕刀具在切削土壤时,均受到土壤的反作用力。传统刀具切削刃任一部位横截面在切削过程中受力如图 9a 所示,截面受力如图 9b 所示。

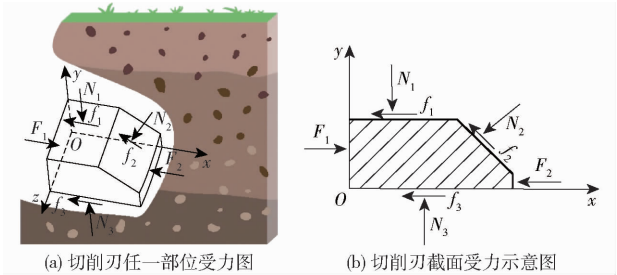


图 9 传统刀具受力示意图

Fig. 9 Schematics of traditional rotary tiller blade

f_i 为土壤对刀具表面的摩擦力, N ; N_i 为土壤对刀具表面的压力, N ; F_1 为刀具切入土壤所受的阻力和, N ; F_2 为刀具切入土壤受到的切向阻力和径向阻

力之和, N 。

规定 y 轴向上为正, x 轴向右为正,在刀具切削土壤过程中,滑动摩擦力 f_2 在 y 方向上不做功,切削刃任一部位横截面在 x 、 y 方向上受力方程为

$$\begin{cases} \sum_i^n X_i = F_1 - F_2 - f_1 - f_3 - f_2 \cos \alpha - N_2 \sin \alpha = 0 \\ \sum_i^n Y_i = N_3 - N_1 - N_2 \cos \alpha = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$f_i = \mu N_i \quad (4)$$

结合式(3)、(4)可得

$$F_1 = F_2 + 2\mu N_1 + N_2 (2\mu \cos \alpha + \sin \alpha) \quad (5)$$

式中 μ ——刀面与土壤之间的摩擦因数

从式(5)中可以看出,切削阻力 F_1 与刀具切入土壤所受到的压力 N_i 和刃口角 α 有关。

图 10a 所示为仿生齿切削过程中受力示意图,图 10b 为截面受力图。

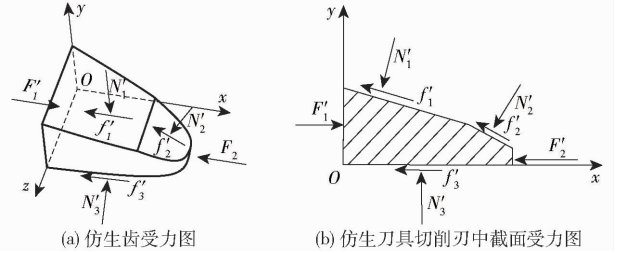


图 10 仿生刀具受力示意图

Fig. 10 Force diagram of bionic rotary tiller blade

f'_i 为土壤对切削刃表面的摩擦力, N ; N'_i 为土壤对旋耕刀切削刃表面的压力, N ; F'_1 为刀具切入土壤所受的阻力和, N ; F'_2 为刀具切入土壤所受到的切向阻力和径向阻力之和, N 。

仿生刀具作业过程中的受力方程为

$$\begin{cases} \sum_i^n X_i = F'_1 - F'_2 - f'_3 - f'_2 \cos \alpha_2 - f'_1 \cos \alpha_1 - N'_2 \sin \alpha_2 - N'_1 \sin \alpha_1 = 0 \\ \sum_i^n Y_i = N'_3 - N'_1 \cos \alpha_1 - N'_2 \cos \alpha_2 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$f'_i = \mu N'_i$$

结合式(4)、(6)可得

$$F'_1 = F'_2 + N'_1(2\mu\cos\alpha_1 + \sin\alpha_1) + N'_2(2\mu\cos\alpha_2 + \sin\alpha_2)$$

(7)

当传统刀具刃口厚度与仿生刀具刃口厚度一致时, $F_2 = F'_2$; 假设刀具受力均匀, 所受正压力与承载面积成正比, 将国标旋耕刀刃口角 45° 、土壤与 65Mn 钢的滑动摩擦因数 $\mu = 0.279^{[4]}$, 和表 4 中的数据代入式(5)、(7)中的剩余部分, 可得 $F'_1 \leq F_1$ 。因此, 仿生旋耕刀能够达到减阻目的。

1.3.2 齿形刀片动力学分析

如图 11 所示, O 为刀具回转中心, 切削过程中土壤对齿形上一点 A 的垂直反作用力为 F , F_1 、 F_2 分别为 F 在水平和垂直方向上的分量, 由于土壤与刀具之间存在摩擦力, 故实际土壤对刀具反作用力 F_p 相对于 F 偏移 θ , f_1 、 f_2 分别为 F_p 在水平和垂直方向上的分量, F_p 在刀刃上的投影为摩擦阻力 F_m , F_m 在水平方向的分力记为 F_3 。

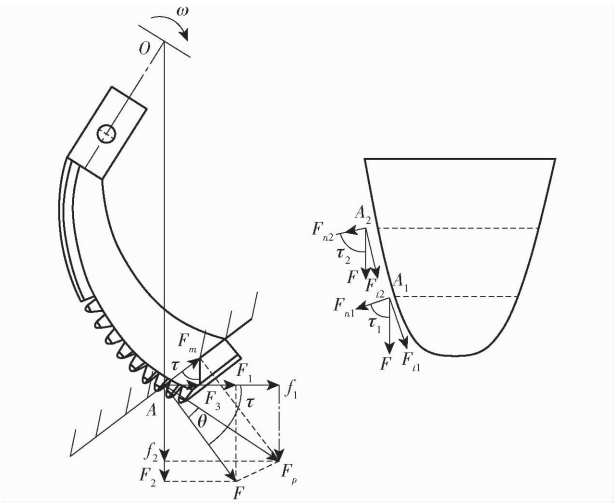


图 11 滑切过程示意图

Fig. 11 Schematic of sliding cutting process

图 11 各物理量关系式为

$$\begin{cases} f_1 = F_1 + F_3 \\ F_1 = F\cos\tau \\ F_3 = F_m\sin\tau \\ F = fl \\ F_m = \mu F \end{cases}$$

(8)

式中 f ——齿形刃口单位长度上所受的垂直反作用力, N
 l ——参与切割的刀刃长度, mm
 τ ——滑切角, 刀刃上任一点运动方向与刀刃线上该点切线的法向夹角

整理可得切削过程阻力 f_1 为

$$f_1 = fl(\cos\tau + \mu\sin\tau)$$

(9)

由式(9)可知, 齿形刃口上所受到的切削阻力与滑切角以及切削过程中的刃口工作长度有关。

1.3.3 爪趾尖端滑移角分析

由图 11 可知, 旋耕刀齿形刃口滑切从 A_1 至 A_2 过程中, 滑切角逐渐增大, τ_1 和 τ_2 分别为 A_1 和 A_2 处的滑切角, F 为作用在 A_1 和 A_2 处刀刃上的垂直反力, k 为某一时刻切削刃的切向斜率, 计算式为

$$k = \frac{F_t}{F_n} = \tan\tau$$

(10)

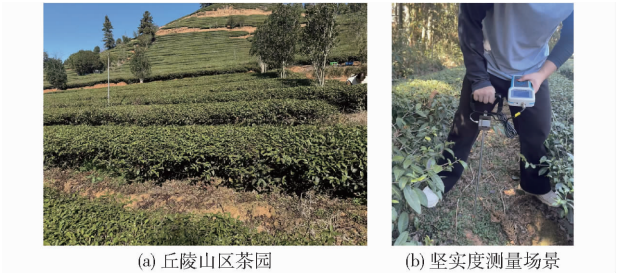
式中 F_t —— F 沿切削刃方向在切向上的分力, N
 F_n —— F 沿切削刃方向在法向上的分力, N

由式(10)可知, 滑切角 τ 和切削刃的切线斜率 k 相关。相关研究表明, 切削阻力与滑切角成反比, 滑切角越大, 切削阻力越小^[19]。

2 离散元仿真试验

2.1 仿真模型构建

南方丘陵山区茶园土壤颗粒内部具有复杂的特殊粘结、破碎属性及力学属性, 表土层(深度 10 cm)坚实度为 1 532 kPa, 心土层(深度 25 cm)坚实度为 1 784 kPa, 图 12 所示为丘陵山区茶园情况及坚实度测量场景。



(a) 丘陵山区茶园 (b) 坚实度测量场景

图 12 丘陵山区茶园及坚实度测量场景

Fig. 12 Measurement scenario of tea plantations and soil compaction in hilly and mountainous areas

EDEM 2023 软件提供的 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型在粘结土壤破碎的过程中具有很好的应用效果, 能够模拟真实土壤颗粒之间切向和法向的运动阻力, 故选用 Hertz - Mindlin with Bonding 模型作为土壤颗粒之间的接触模型^[20-21]。外界对土壤的法向粘结力 F_n 、切向粘结力 F_τ 和法向力矩 M_n 、切向力矩 M_τ 计算式为

$$\begin{cases} \Delta F_n = -v_n S_n A \Delta t \\ \Delta F_\tau = -v_\tau S_\tau A \Delta t \\ \Delta M_n = -\omega_n S_n J \Delta t \\ \Delta M_\tau = -\omega_\tau S_\tau \frac{J}{2} \Delta t \\ A = \pi R_b^2 \\ J = \frac{1}{2} \pi R_b^4 \end{cases}$$

(11)

式中 A ——土壤颗粒间的接触区域面积, m^2
 R_b ——土壤颗粒间的粘结半径, m
 J ——土壤颗粒的截面极惯性矩, m^4

$S_n、S_\tau$ ——粘结颗粒法向、切向刚度, N/m
 $v_n、v_\tau$ ——颗粒法向、切向分量速度, m/s
 $\omega_n、\omega_\tau$ ——颗粒法向、切向分量角速度, rad/s
 Δt ——时间步长, s

在离散元仿真过程中,当外界施加的作用力大于极限应力值时,土壤之间的粘结会被破坏。法向极限应力 $\sigma_{\max}$ 和切向极限应力 $\tau_{\max}$ 条件为

$$\begin{cases} \sigma_{\max} \leqslant \frac{-F_n}{A} + \frac{M_\tau}{J} R_b \\ \tau_{\max} \leqslant \frac{-F_\tau}{A} + \frac{M_n}{J} R_b \end{cases} \quad (12)$$

表 4 离散元仿真材料性能参数与接触参数

Tab. 4 Discrete element simulation material properties and contact parameters

参数	数值	参数	数值
65Mn 钢密度/(kg·m ⁻³)	7 865	土壤-土壤恢复系数	0.516
65Mn 钢剪切模量/Pa	7.9×10 ¹⁰	土壤-65Mn 钢静摩擦因数	0.279
65Mn 钢泊松比	0.3	土壤-65Mn 钢滚动摩擦因数	0.104
表土层土壤密度/(kg·m ⁻³)	1 645	土壤-65Mn 钢恢复系数	0.487
心土层土壤密度/(kg·m ⁻³)	1 770	土壤法向单位面积粘结刚度/(N·m ⁻³)	5×10 ⁷
土壤泊松比	0.398	土壤切向单位面积粘结刚度/(N·m ⁻³)	9×10 ⁷
土壤剪切模量/Pa	1×10 ⁶	土壤法向粘结临界应力/Pa	5×10 ⁵
土壤-土壤静摩擦因数	0.691	土壤切向粘结临界应力/Pa	5×10 ⁵
土壤-土壤滚动摩擦因数	0.064		

将 Solidworks 三维绘图软件绘制的国标刀具与仿生刀具输出为 IGS 格式并导入到 EDEM 软件中。建立尺寸(长×宽×高)为 1 000 mm×500 mm×250 mm 的土槽-旋耕刀互作模型,图 13 所示为颗粒图形及仿真图。

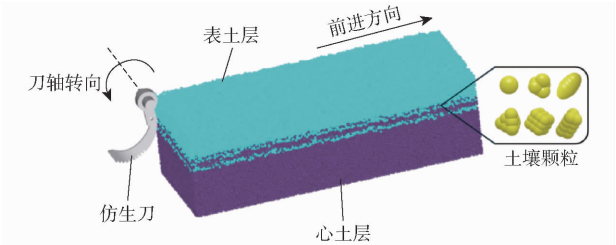


图 13 作业仿真图

Fig. 13 Operation simulation diagram

2.2 离散元试验方案

仿真过程中,在前进速度恒为 0.5 m/s,刀轴转速分别为 150、200、250 r/min 下开展试验,研究不同耕深(80、120、160 mm)情况下传统刀具和仿生刀具作业过程刀轴所受平均扭矩和碎土率,平均扭矩为除去扭矩为零时刻点外求取剩下时刻点的扭矩平均值,碎土率为刀具作业时切断的土壤颗粒 Bond 键占总生成的颗粒 Bond 键数,仿真过程每 0.02 s 保存一次。

2.3 刀轴扭矩仿真试验结果

图 14 为转速 200 r/min、前进速度 0.5 m/s、耕

EDEM 离散元仿真基本原理是用球模拟土壤颗粒模型。应用地区的不同,土壤颗粒种类也不完全相同,本研究对象为南方丘陵山区茶园土壤。利用 EDEM 软件中多球面组方法对南方丘陵山区茶园土壤简化形成 6 种颗粒形状,单颗土壤颗粒直径 3~6 mm,土壤颗粒的粒径倍率设置为 0.9~1.1 的随机分布,并对土槽进行分层处理,0~100 mm 为表土层;100~250 mm 为心土层。仿真试验中的土壤参数采用团队前期研究成果^[4],模型中的主要粘结参数、各个材料之间的物理参数以及其他参数如表 4 所示。

深 120 mm 情况下不同刀具旋耕过程所受扭矩变化曲线。

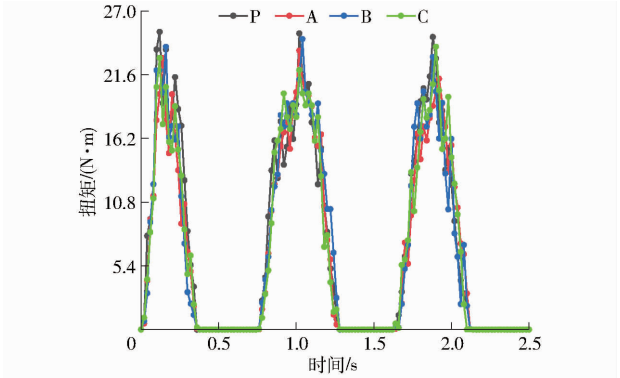


图 14 不同刀具扭矩仿真曲线

Fig. 14 Simulation curves of torque for different cutters

由图 15 可知在仿真过程中,耕深不变时,刀轴所受平均扭矩随着转速增加而增加,且转速越大,各刀具刀轴所受扭矩越接近;刀轴转速不变时,刀轴所受平均扭矩随着耕深增加而增加,且耕深越深,扭矩增加越快,耕深对刀轴平均扭矩的影响大于刀轴转速。仿真结果表明 3 种仿生刀具相较于传统刀具都有一定的减阻效果,其中仿生刀具 A 相较于传统刀具减阻效果最明显,3 种仿生刀具相较于传统刀具平均扭矩分别降低了 6.40%、3.73%、5.08%。

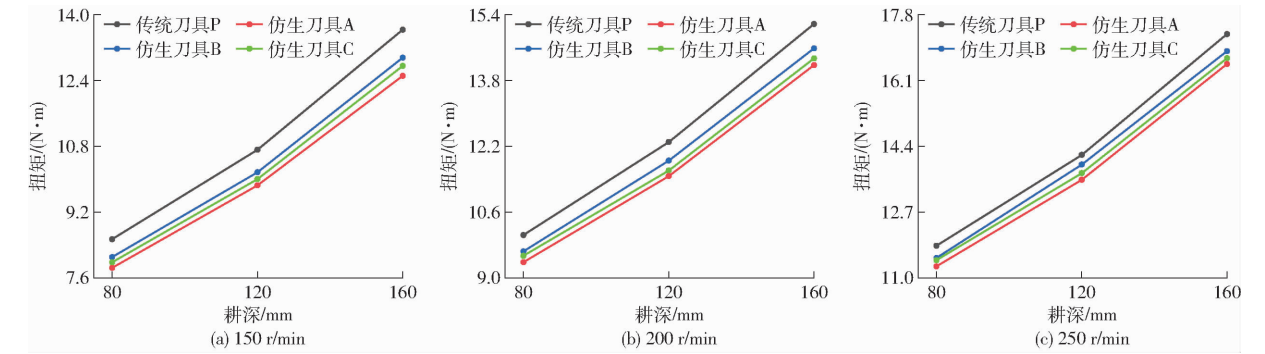


图 15 不同工况下各刀具刀轴所受平均扭矩变化曲线

Fig. 15 Variation curves of average torque on cutter shaft of different tools under different working conditions

2.4 碎土性能仿真试验结果

仿真时长为 2.5 s,土壤颗粒间总生成 Bond 键数为 126 750,将仿真过程中发生断裂的 Bond 键数目与 Bond 键总数之比定义为碎土率。在转速 200 r/min、前进速度 0.5 m/s、耕深 120 mm 的情况下 Bond 键断裂的情况如图 16 所示,刀具初步接触土壤时,土壤 Bond 键的断裂数量迅速增加,随后呈现周期性增长趋势。在整个仿真过程中,仿生刀具的碎土性能始终优于传统刀具,且随着仿真时间的推进,仿生刀具所切断的土壤颗粒 Bond 键数目与传统刀具之间的差距逐渐增大。

由图 17 可得:随着耕深加大,刀具与土壤接触面积增加,断裂 Bond 键增加;随着刀轴转速增加,断裂 Bond 键数目增加速率逐渐变缓,且随着刀轴转速的增加各刀具碎土率越来越接近,这可能是由于前进速度不变,转速增加使得刀具切削土壤的重叠区域增加,刀

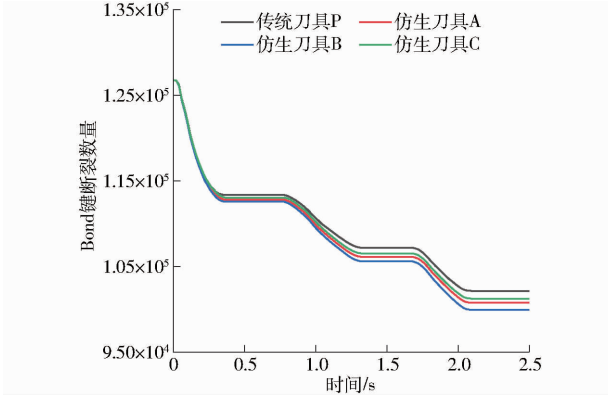


图 16 不同刀具的 Bond 键断裂数量变化曲线

Fig. 16 Bond cleavage of different tools

具对土壤的切削更加充分。相较于传统刀具 P,仿生刀具 A、B、C 碎土率分别提升了 7.09、8.82、4.68 个百分点,碎土性能整体表现由优到劣依次为 B、A、C,差异原因可能是由于仿生爪趾的尖端轮廓不同引起的。

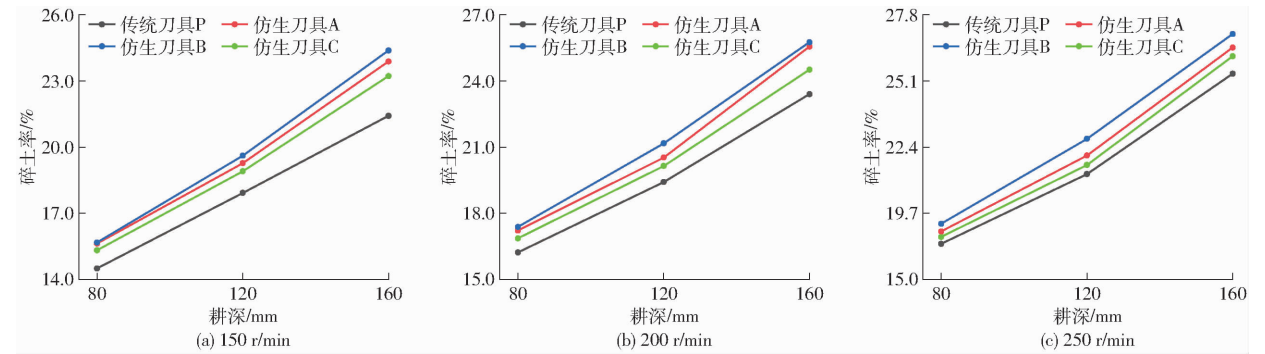


图 17 不同工况下各刀具碎土率变化曲线

Fig. 17 Variation curves of soil fragmentation rate of different tools under different working conditions

3 台架试验

3.1 试验设备与材料

台架试验在福建农林大学机电工程学院实验室进行,土壤取自南平市武夷山大坪洲茶园,含水率为 24.51%,0 ~ 25 cm 坚实度为 1 784 kPa。试验装置主要有 CBX1204-1000 型减速电机、齿轮齿条滑台导轨、变频调速器、扭矩传感器、拉力器、传统刀具及

仿生刀具,台架如图 18 所示。

3.2 试验设计

试验前对土壤进行 0 ~ 25 cm 的压实填充,具体方法为:①对下层土壤(深度 10 ~ 25 cm)填充并进行压实。②对上层土壤(深度 0 ~ 10 cm)填充并进行压实。③通过坚实度测量仪分别测量上下层坚实度,并使下层土壤坚实度和原试验田土壤坚实度误差控制在 5% 以内。试验时将传统刀具、仿

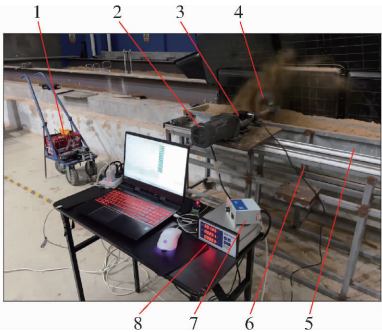


图 18 试验台架

Fig. 18 Test bench

1. 试验配套装置 2. 减速电机 3. 扭矩传感器 4. 旋耕刀具
5. 土槽 6. 滑台导轨 7. 变频调速器 8. 扭矩功率分析仪

生刀具分别加装于试验台上,刀轴转速设定为 150、200、250 r/min,前进速度保持为 0.5 m/s;耕深保持为 120 mm 展开试验。通过调节变频调速器控制刀具转速稳定于目标值之后,通过配套装置使滑台按照设定速度前进。每次试验过后将土壤压实,确保每次试验条件基本一致,每组试验重复 3 次,求取平均值。

3.3 刀轴扭矩台架试验结果

台架试验结果如表 5 所示,在固定前进速度 (0.5 m/s) 与耕深 (120 mm) 条件下,刀具扭矩均随刀轴转速提高而呈单调递增趋势,与旋耕作业中刀具与土壤动态相互作用的基本力学规律一致,即转速升高导致单位时间内切削次数增加、土壤扰动增强,进而引起扭矩负载上升。在相同工况下,3 种仿生刀具的平均扭矩均低于传统刀具 P,相较于传统刀具 P 平均扭矩相应下降了约 7.25%、4.01%、5.49%,不同的仿生刀具其减阻效果存在差异。

表 5 刀轴扭矩台架试验结果

Tab.5 Bench test results of cutter shaft torque

旋耕刀类型	前进速度/ (m·s ⁻¹)	耕深/ mm	刀轴转速/ (r·min ⁻¹)	平均扭矩/ (N·m)
传统刀具 P	0.5	120	150	11.56
			200	13.09
			250	15.11
仿生刀具 A	0.5	120	150	10.75
			200	12.19
			250	14.12
仿生刀具 B	0.5	120	150	11.04
			200	12.54
			250	14.53
仿生刀具 C	0.5	120	150	10.94
			200	12.39
			250	14.30

4 田间试验

4.1 试验设备与材料

田间试验在南平市武夷山大坪洲茶园进行,作业平台为手扶开沟机,旋耕刀、抛土刀组合安装,发动机功率 5 kW,整机质量不大于 90 kg,外形尺寸 (长×宽×高) 为 1.2 m×0.6 m×0.8 m,刀轴转速 150~250 r/min,开沟深度 0~0.3 m,可通过调节限深轮改变开沟深度,田间试验如图 19 所示。



图 19 田间试验场景

Fig. 19 Field experiment

4.2 田间试验设计

田间试验依次将传统刀具、3 种仿生刀具安装于反旋开沟机上,旋耕作业前在两侧铺上黑色薄膜,调节限深轮高度保持开沟深度为 12 cm,每次前进速度恒为 0.5 m/s,在 3 种旋耕转速挡位 (150、200、250 r/min) 下进行旋耕作业,每次作业行程不低于 10 m,随机选取每段行程的 5 个区域进行碎土质量统计,并求取平均值。

4.3 田间试验结果

待旋耕过后,采取随机取样法对旋耕后试验田抛土区域的土壤进行筛选,每次选取区域面积为 0.5 m×0.5 m,选取最大尺寸大于 30 mm 土块,如图 20 所示,使用电子天平测量其质量并记录,碎土率计算公式为

$$P = (1 - m/M) \times 100\%$$
 (13)

式中 P——土壤破碎率, %



图 20 土壤碎土率测定

Fig. 20 Determination of soil fragmentation rate

m ——土块最长边大于 30 mm 的土块质量, kg
 M ——测试区域土块总质量, kg
田间碎土测试结果如表 6 所示。

表 6 碎土率试验结果
Tab. 6 Soil fragmentation rate test results %

旋耕刀 类型	转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)			均值
	150	200	250	
A	89. 62	91. 91	93. 50	91. 68
B	91. 02	93. 29	94. 21	92. 84
C	87. 82	90. 25	91. 52	89. 86
P	83. 70	86. 45	88. 73	86. 29

3 种仿生刀具相对于传统刀具平均碎土率分别提升了 5. 39、6. 55、3. 57 个百分点。
为进一步验证仿生刀具的田间耕作质量, 将 3 种仿生刀具与抛土刀具间隔安装于同一侧并在南平市武夷山大坪洲茶园展开累计 3 h 以上田间作业验证试验, 图 21 所示为旋耕前后的垄间情况。



图 21 田间试验情况

Fig. 21 Field trial status

作业后仿生齿情况如图 22 所示, 3 种仿生刀具



图 22 耕后刀具情况

Fig. 22 Blade entanglement condition

齿间均存在不同程度的塞土现象, 其中 C 型刀具最为严重, 齿间土体淤积会包覆切削刃、弱化刀具对土壤的剪切破碎作用, 这可能是导致其碎土率低于 A、B 型的主要原因。

田间试验结果表明, 仿生刀具对于我国南方丘陵地区多杂草、土壤板结的复杂作业环境具备较高的适用性。

5 结论

(1) 分析了鼯鼠前足中间 3 趾的特征, 分别用高斯方程和五阶多项式方程对爪趾尖端轮廓和侧向轮廓进行拟合, 决定系数均不低于 0. 998 6, 误差平方和均不大于 0. 008 5; 基于拟合轮廓曲线, 对背向轮廓进行曲率分析, 并简化为楔形轮廓, 基于楔子理论与刀具受力模型对仿生刀具进行了减阻机理分析, 分析结果表明仿生刀具切削阻力小于传统刀具切削阻力。

(2) 采用 Hertz – Mindlin with Bonding 土壤接触模型, 用 EDEM 2023 离散元软件构建了带有粘结键的土壤旋耕刀相互作用仿真模型, 采取多球面组合方式, 将土壤颗粒的粒径倍率设置为 0. 9 ~ 1. 1 的随机分布, 并对土槽进行分层处理, 对传统旋耕刀和仿生旋耕刀分别展开了不同耕深和刀轴转速下的仿真试验, 结果表明 3 种仿生刀具的刀轴扭矩相比于传统刀具平均扭矩分别降低了 6. 40%、3. 73%、5. 08%, 碎土率分别提升了 7. 09、8. 82、4. 68 个百分点, 综合来看, 刀具 A 具有最佳作业性能。

(3) 设计台架试验, 在前进速度为 0. 5 m/s、耕深保持为 120 mm 下展开传统刀具与仿生刀具的平均扭矩对比试验。台架试验表明, 仿生刀具相较于传统刀具 P 平均扭矩相应下降了约 7. 25%、4. 01%、5. 49%, 不同的仿生刀具其减阻效果存在差异, 整体表现为刀具 A 最优, 刀具 B 最差。

(4) 开展田间试验, 对仿生刀具和传统刀具的碎土破茬性能进行对比。以恒定前进速度、开沟深度进行旋耕作业, 田间碎土试验表明: 仿生刀具 A、B、C 作业碎土率平均值分别为 91. 68%、92. 84%、89. 86%, 与传统刀具相比分别提升了 5. 39、6. 55、3. 57 个百分点。

参 考 文 献

[1] 杨玉婉, 佟金, 马云海, 等. 基于鼯鼠多趾结构特征的仿生切土刀片设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 122 – 128.
Yang Yuwan, Tong Jin, Ma Yunhai, et al. Design and experiment of bionic soil-cutting blade based on multi-toe structural characteristics of mole[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 122 – 128. (in Chinese)
[2] 徐慧云, 朱绪超, 彭诚, 等. 南方典型第四纪红黏土物理结皮发育过程和结构特征[J]. 水土保持学报, 2025, 39(5): 53 – 62.

- Xu Huiyun, Zhu Xuchao, Peng Cheng, et al. Development process and structural characteristics of physical crusts in typical quaternary red clay in southern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(5): 53–62. (in Chinese)
- [3] 陈玉真,王峰,尤志明,等.不同土壤类型茶园土壤物理性状特征研究[J].茶叶科学技术,2014(1):12–17.
Chen Yuzhen, Wang Feng, You Zhiming, et al. Soil physical properties with different soil types of tea garden[J]. Tea Science and Technology, 2014(1):12–17. (in Chinese)
- [4] 陈龙彬,陈凌霄,郑书河.生态茶园“土壤-绿肥根茬秸秆-开沟触土部件”离散元模型建立与验证[J].福建农林大学学报(自然科学版),2025,54(3):420–431.
Chen Longbin, Chen Lingxiao, Zheng Shuhe. Establishment and verification of discrete element model for “soil–green manure root stubble straw–trenching soil-engaging component” in ecological tea garden[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2025, 54(3): 420–431. (in Chinese)
- [5] Cheng Jian, Zheng Kan, Xia Junfang, et al. Preliminary exploration of a novel tillage tool based on ultrasonic vibration-assisted cutting for efficient and sustainable agricultural tillage[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 521: 146233.
- [6] Zhou Deyi, Hou Pengfei, Xin Yuelin, et al. Resistance and consumption reduction mechanism of bionic vibration and verification of field subsoiling experiment[J]. Applied Sciences, 2021, 11(21):10480.
- [7] 张琰,乔超雄,王天琪,等.蝼蛄前足爪趾三维几何构形的减阻机理[J].农业工程学报,2021,37(19):309–315.
Zhang Yan, Qiao Chaoxiong, Wang Tianqi, et al. Drag reduction mechanism of the 3D geometry of foreleg’s claw toe of the mole cricket (*Gryllotalpa orientalis*) [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(19):309–315. (in Chinese)
- [8] 贾洪雷,王万鹏,陈志,等.农业机械触土部件优化研究现状与展望[J].农业机械学报,2017,48(7):1–13.
Jia Honglei, Wang Wanpeng, Chen Zhi, et al. Research status and prospect of optimization of soil-engaging components of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):1–13. (in Chinese)
- [9] 曹成茂,刘忠滨,丁武阳,等.宁前胡仿生挖掘铲设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(11):102–113.
Cao Chengmao, Liu Zhongbin, Ding Wuyang, et al. Design and experiment of Ning-guo radix peucedani bionic digging shovel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 102–113. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] Qin Yue, Gao Yunpeng, Xie Chenggong, et al. Design and test of an energy-saving bionic-inspired rotary blade: a study on power consumption and soil surface quality[J]. Agriculture, 2025, 15: 9.
- [12] Li Xiangyu, Wang Zhaojie, Gu Tianlong, et al. Design of bionic rotary tiller blades based on marmot claws and research on anti-entanglement and drag reduction performance[J]. Available at SSRN 5561800, 2025, 12: 101586.
- [13] 肖茂华,汪开鑫,杨望,等.基于东方蝼蛄爪趾的仿生旋耕刀设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(2):55–63.
Xiao Maohua, Wang Kaixin, Yang Wang, et al. Design and experiment of bionic rotary blade based on claw toe of gryllotalpa orientalis burmeister[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2):55–63. (in Chinese)
- [14] 程慧.水稻秸秆减阻旋耕部件优化设计与仿真研究[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2025.
Cheng Hui. Optimization design and simulation study of drag-reducing rotary tillage component for rice straw[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2025. (in Chinese)
- [15] Zhang Fubin, Luo Zhitao, Zheng Enlai, et al. Imitating pangolin scale structure for reducing adhesion and resistance of rotary tillage in wet-adhesive soil[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 245: 106306.
- [16] Yang Yuwan, Li Mo, Tong Jin, et al. Study on the interaction between soil and the five-claw combination of a mole using the discrete element method. [J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2018, 2018(1): 7854052.
- [17] 刘财勇.鼯鼠(*Scaptochirus moschatus*)爪趾切削机理研究[D].长春:吉林大学,2008.
Liu Caiyong. Research on the cutting mechanism of claw toes of the mole (*Scaptochirus moschatus*) [D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)
- [18] 刘谦文,杨有刚.基于ANSYS/LS-DYNA的旋耕刀强度和功耗研究[J].中国农机化学报,2017,38(6):16–19.
Liu Qianwen, Yang Yougang. Research on strength and power consumption of rotary blade based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(6): 16–19. (in Chinese)
- [19] 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 drag-reducing stubble-cutting blade based on cricket incisor teeth[J]. Journal of Engineering Design, 2018, 25(4): 409–419. (in Chinese)
- [20] 宋占华,李浩,闫银发,等.桑园土壤非等径颗粒离散元仿真模型参数标定与试验[J].农业机械学报,2022,53(6):21–33.
Song Zhanhua, Li Hao, Yan Yinfa, et al. Parameter calibration and experiment of discrete element simulation model for non-equal diameter particles in mulberry field soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 21–33. (in Chinese)
- [21] 姜嘉胤,董春旺,倪益华,等.基于离散元法的茶园仿生铲减阻性能研究[J].茶叶科学,2022,42(6):791–805.
Jiang Jiayin, Dong Chunwang, Ni Yihua, et al. Research on drag reduction performance of bionic shovel in tea garden based on discrete element method[J]. Journal of Tea Science, 2022, 42(6): 791–805. (in Chinese)