

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.11.010

宁前胡仿生挖掘铲设计与试验

曹成茂^{1,2} 刘忠滨^{1,2} 丁武阳^{1,2} 吴慢玉^{1,2} 张雪晨^{1,2} 秦 宽^{1,2}

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 安徽省智能农机装备工程实验室, 合肥 230036)

摘要: 针对宁前胡采挖过程中挖掘阻力大的问题,以鲨鱼背鳍为研究对象,并结合农艺要求,设计了一款宁前胡仿生挖掘铲;根据摩尔-库仑理论中土体应力分析,当选用鲨鱼背鳍结构作为仿生铲的凸起结构时,土壤更易达到破裂状态;通过三维扫描仪扫描鲨鱼标本,获取鲨鱼背鳍三维模型,根据背鳍三维模型确定仿生铲的凸起结构,并通过NX12.0创建仿生挖掘铲三维模型;利用三维扫描仪获得宁前胡根茎外形轮廓特征,创建宁前胡根茎的离散元模型,并选用Hertz-Mindlin with JKR建立宁前胡根茎-土壤离散元复合模型;通过离散元仿真对比试验,得出X、Y、Z方向颗粒位移和挖掘阻力的平均值,分析挖掘铲的减阻机理,仿生铲比平面铲在采挖过程中阻力减小14.37%;通过开展土槽试验,对比根茎挖掘效果,与仿真试验中得出的宁前胡根茎在仿生挖掘铲挖掘后,根茎在X、Y、Z方向上有更好的位移表现,仿生铲和平面铲的挖掘阻力平均值分别为1 342.28、1 622.73 N,仿生铲比平面铲在采挖过程中阻力减小17.28%,与仿真试验得出的减阻率十分接近,满足宁前胡采挖过程中的减阻要求。

关键词: 鲨鱼背鳍; 宁前胡根茎; 仿生挖掘铲; 离散元

中图分类号: S225.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)11-0102-12 **OSID:** 

Design and Experiment of Ning-guo *Radix peucedani* Bionic Digging Shovel

CAO Chengmao^{1,2} LIU Zhongbin^{1,2} DING Wuyang^{1,2} WU Manyu^{1,2} ZHANG Xuechen^{1,2} QIN Kuan^{1,2}

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. Anhui Province Engineering Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery and Equipment, Hefei 230036, China)

Abstract: To address the problem of high digging resistance during the excavation of Ning-guo *Radix peucedani*, a bionic digging shovel was designed with the shark dorsal fin as the research object; according to the soil stress analysis in Moore - Coulomb theory, the soil was more likely to reach the rupture state when the shark dorsal fin structure was selected as the raised structure of the bionic shovel. The shark specimen was scanned by 3D scanner, the shark dorsal fin 3D model was got, the projection structure of the bionic shovel was determined according to the dorsal fin 3D model, and the bionic digging shovel 3D model was created by NX12.0; the shape profile characteristics of the rootstock of Ning-guo *Radix peucedani* were obtained by 3D scanner, and the discrete element model of the rootstock of Ning-guo *Radix peucedani* was created, and the discrete element composite model of Ning-guo *Radix peucedani* rootstock-soil was established by Hertz - Mindlin with JKR; through the discrete element simulation comparison, the average values of particle displacement and excavation resistance in X, Y and Z directions were obtained from the simulation test, the drag reduction mechanism of excavating shovels was analyzed, and the resistance of the bionic shovel was reduced by 14.37% compared with the plane shovel in the excavation process; by conducting soil trench tests and comparing the rhizome excavation effect, it was basically consistent with the better displacement performance of Ning-guo *Radix peucedani* rhizome in X, Y and Z directions after excavation with the bionic digging shovel derived from simulation tests, and the average values of excavation resistance of the bionic shovel and the plane shovel were 1 342.28 N and 1 622.73 N, respectively. The resistance of the bionic shovel was 17.28% lower than that of the flat shovel in the excavation process, which was very close to that of the simulation test and met the requirements of resistance reduction in the excavation process of Ning-guo *Radix peucedani*.

Key words: shark dorsal fin; Ning-guo *Radix peucedani* rhizome; bionic digging shovel; discrete element method

收稿日期: 2023-06-10 修回日期: 2023-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(52105239)和安徽省农业竞争力提升科技行动项目(AHSJXY202034060014)

作者简介: 曹成茂(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: ccm@ahau.edu.cn

0 引言

前胡是一种药用价值很广的中药材^[1-2],由于宁国市地理环境的特殊性,当地前胡作为地理标志产品,所以被称为“宁前胡”。宁前胡机械化采挖不仅可以降低药农的工作强度,还可以提高工作效率。在提高收获率的同时,减小挖掘阻力则对机械化水平提出了更高的要求,而采用仿生设计和离散元优化是当前农机领域减阻研究的重要途径之一^[3]。

近年来,由于离散元仿真技术不断发展,越来越多的学者在土壤模型建立、物料参数标定、工作机理研究以及土壤扰动等方面的研究中运用离散元仿真技术。在仿生研究与设计方面,杨玉婉等^[4]根据鼯鼠多趾结构特征,研制了一种新型的仿生旋耕刀,通过试验对比,得出整机功耗减小 20%。俞杰^[5]根据兔爪趾结构特征,研制了一种新型的仿生旋耕刀,通过试验对比得出,其减阻率达到 17.8%。肖茂华等^[6]对蜈蚣爪趾的边缘曲线进行提取研究,设计了仿生旋耕刀,通过试验对比,验证了离散元模型的可靠性;樊昱^[7]通过构建马铃薯根系土壤体离散元模型,利用不同铲形进行试验对比,得到其工作过程中的阻力,验证离散元模型的准确性和可靠性;张兆国等^[8]通过构建三七根茎和土壤混合离散元仿真模型,对不同铲型分析根土颗粒位移流向情况和铲面所受阻力情况,验证仿生挖掘铲的减阻性。由以上文献可知,关于宁前胡根土模型的构建和对宁前胡挖掘机理的分析仍有待研究,为有效减小阻力,设计仿生挖掘铲具有重要的意义。

采用文献中的离散元法和仿生技术方法,以宁前胡根茎和土壤作为试验材料,测定其物理参数,利用三维扫描仪获得宁前胡根茎外形轮廓特征,创建宁前胡根茎离散元模型,并建立根茎-土壤离散元复合模型;根据鲨鱼在游动过程中背鳍的物理特性,利用三维扫描仪获得鲨鱼背鳍的三维曲面,创建仿生挖掘铲三维模型,并进行力学分析,结合仿真试验和土槽试验对比,检验仿生挖掘铲的减阻效果。

1 宁前胡根茎-土壤离散元模型

宁前胡种植农艺要求为垄作,植株行距 250 mm,垄宽一般为 810 mm,沟宽 200 mm,垄高 180 mm,如图 1 所示;待采挖的宁前胡根系深入土壤且根系在土壤中分布不均匀,且成熟后的宁前胡根系深度大概在 180 ~ 200 mm,根深对挖掘铲的入土深度有着很大的影响,并且土壤之间的粘结力与

入土深度呈正比关系,挖掘铲的承载力和工作时所受到的阻力也会随着入土深度的增加而增加,这也是挖掘铲阻力的主要来源之一^[9];因此宁前胡根茎和种植土壤基本物理参数的确定对分析根土间的相互作用力和离散元仿真模型的构建,均有一定的影响。

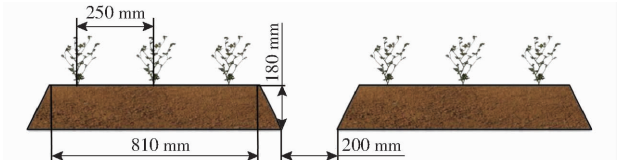


图 1 宁前胡种植农艺图

Fig. 1 Ning-guo *Radix peucedani* planting agronomy chart

1.1 宁前胡根茎及土壤物理参数测定

1.1.1 根茎密度物理参数测定

宁前胡根茎及种植土壤样本选自安徽省宁国市竹川村前胡种植基地,选取同一垄中位于中间位置种植的宁前胡,面积约为 1 m²,且无病害的宁前胡根茎 20 株。由于宁前胡根茎外形不规则,在测量根茎密度时,使用比重杯法,测得宁前胡根茎密度平均值为 1 105 kg/m³。

1.1.2 土壤物理参数测定

宁前胡种植土壤主要是以砂壤土为主,并以离散化形态存在,为减小采样过程中的差异性,取样试验采用五点采样法,根据宁前胡种植农艺要求,取样深度为 180 ~ 200 mm,每个样本为 1 000 g,上下误差不超过 10 g,利用标准试验筛开展 20 组试验^[10],取均值得 0 ~ 1 mm 颗粒、1 ~ 2 mm 颗粒、2 ~ 5 mm 颗粒、5 ~ 10 mm 颗粒以及 10 mm 以上颗粒占比分别为 21.54%、19.15%、21.41%、20.94% 和 16.96%。土壤筛分结果如图 2 所示。

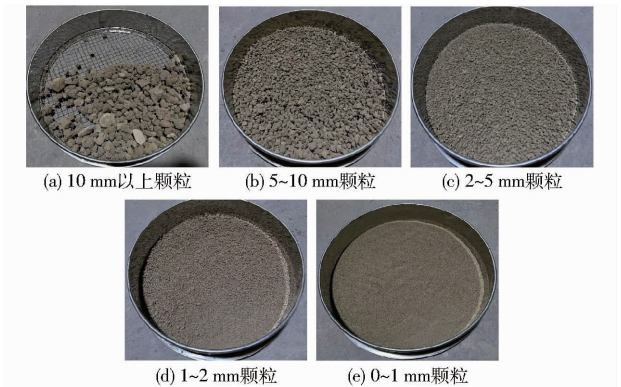


图 2 土壤筛分结果

Fig. 2 Soil sieving results

土壤之间的粘结力与含水率密切相关,含水率会影响土壤颗粒间的粘结力和土壤之间的结合类型,为后续仿真试验选择离散元复合模型奠定基础^[11]。考虑到宁前胡种植的农艺要求,选用土壤温

湿度传感器对种植土壤不同深度的含水率进行测定,本文采用中国普锐森社公司生产的土壤温湿度传感器,型号为 PR-3000-TR,分别测定深度 50、100、150、200 mm 的含水率,并通过 USB 连接至计算机,将数据导出,获得不同深度的平均含水率分别为 6.53%、10.18%、14.08%、17.14%。

1.2 宁前胡根茎及土壤离散元模型

仿真试验中,准确建立离散元仿真模型至关重要,通过环刀法对宁前胡种植土壤密度进行测定,测定空载状态下环刀容积与质量,将种植土壤装入环刀内,使用刮刀将堆积的土壤沿环刀上表面刮平,放在电子秤上进行称量,减去空载环刀的质量即为所测土壤质量,根据公式可得出种植土壤密度并取平均值,为 $1\,810\text{ kg/m}^3$ 。查阅文献[8,12-13],确定宁前胡根茎泊松比为 0.335,剪切模量为 $5.135\times 10^6\text{ Pa}$,土壤泊松比为 0.35,剪切模量为 $1\times 10^6\text{ Pa}$ 。

1.2.1 宁前胡根茎离散元模型

逆向工程技术是以现代设计理念、方法和技术为基石,在现有的实物基础上,对其模型进行重建,通过现代化数字测量手段,利用三维扫描仪对根茎结构进行采样,得到点云数据,生成模型,然后进行修改、优化、再设计的过程^[14-15]。受多种因素影响,成熟后的宁前胡根茎形状不规则,其根大多呈倒圆锥形,以主根和支根为主体,支根上的须根容易缠绕在土壤中。因此在使用逆向工程技术提取宁前胡根茎结构特征时,难度过大,为降低三维扫描建模难度,扫描时先不考虑支根。参照文献[16-18]中的建模方法,利用三维扫描仪对宁前胡根茎的外形轮廓特征进行快速的扫描和提取,并对其进行精确的立体解译,可以提高建模效率,使获得的模型与实际状态更加贴近。

采用加拿大 CREAFORM 公司 HandySCAN BLACK 系列便携式 3D 扫描仪,外型尺寸(长×宽×高)为 $142\text{ mm}\times 79\text{ mm}\times 288\text{ mm}$,质量 0.94 kg,扫描区域 $310\text{ mm}\times 350\text{ mm}$,扫描精度为 0.025 mm,测量速率为 1 300 000 次/s。

选取宁国市胡乐镇前胡样本,为提高建模效率,在扫描时,先剪除支根,然后在主根周围粘贴定位贴纸,用于尺寸定位;确定扫描区域范围,先扫描样本正面,翻转 180°后,再对根茎反面进行扫描,得到点云数据,利用正反面翻转扣合的方法进行模型构建,将扫描得到的点云数据导入后处理软件 Geomagic studio 2013 中。在后处理过程中,对某些区域内的凸起部分以圆弧过渡,对部分未扫描到的区域进行人工填补,利用去除特征将多边形的凹凸去除,去除表面不规则特征,对局部不平整的表面通过砂纸功

能进行打磨,最终生成一个封闭的、光顺的多边形模型,由于所选前胡根为未到收获季节的前胡根,因此将后处理获得的宁前胡主根三维图形以 STL 格式导入 NX12.0 中进行等比例放大,扫描建模过程如图 3 所示。

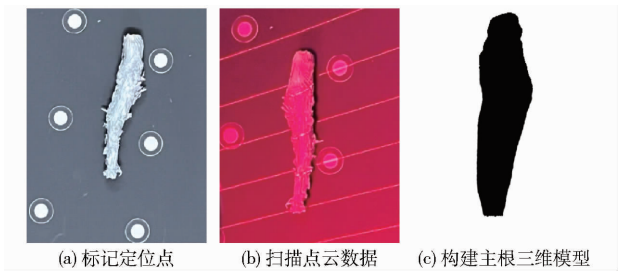


图 3 根茎主根三维扫描建模过程
Fig.3 Rootstock 3D scanning modelling process

宁前胡根茎主根建模完成后,结合根茎支根与土壤的粘结,通过对宁前胡根茎支根实物测绘,按照主根的放大比例对支根进行放大。三维制图软件选用 Siemens 公司的 NX12.0,利用 NX12.0 中曲线扫描命令,对三维扫描获取的宁前胡主根三维模型进行支根建模。由于在采挖过程中,宁前胡的破损主要表现在根茎的破皮和断裂,因此在创建离散元模型时,颗粒填充类型选用 Hertz-Mindlin with Bonding 模型,参考根茎类药材物料的设置^[8,19-20],设置宁前胡根茎 Bonding 键法向刚度和切向刚度分别为 5×10^7 、 $3.2\times 10^7\text{ N/m}$,临界法向和切向应力分别为 8×10^6 、 $6.7\times 10^6\text{ Pa}$,粘结半径设置为 8.55 mm;为能更好地模拟真实环境,对收获的宁前胡根茎三维尺寸进行测量试验,测得宁前胡根茎长×宽×高平均尺寸为 $177.61\text{ mm}\times 148.62\text{ mm}\times 112.56\text{ mm}$,主根平均直径为 24.2 mm,如图 4 所示。考虑到仿真效率,设置颗粒直径主根为 1 mm、支根为 0.5 mm,共 14 000 个颗粒进行填充,得出宁前胡离散元模型如图 5 所示。



图 4 宁前胡根茎三维尺寸图
Fig.4 3D dimensional drawing of Ning-guo
Radix peucedani rhizome

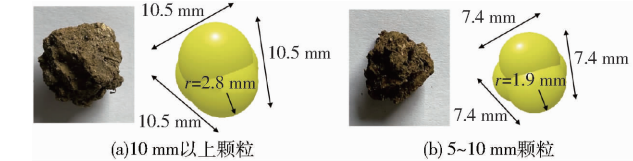
1.2.2 土壤离散元模型

土壤筛分完成后,通过观察可知 10 mm 以上和



图 5 宁前胡根茎离散元模型

Fig. 5 Discrete element model of Ning-guo Radix peucedani rhizome



5 ~ 10 mm 的颗粒形状不规则,故选用组合的方式完成,颗粒总长分别为 10.5、7.4 mm,半径 r 分别为 2.8、1.9 mm;土壤颗粒 0 ~ 1 mm、1 ~ 2 mm、2 ~ 5 mm 的形状为类圆球形,故采用圆球形颗粒类型,颗粒半径 r 分别为 0.35、0.75、1.6 mm。颗粒类型及半径如图 6 所示。

1.3 宁前胡根茎-土壤的离散元复合模型

根茎与土壤之间的粘结,主要原因是支根易和土壤缠绕,根据土壤与根茎表皮粘附特性和土壤自



图 6 土壤颗粒半径模型

Fig. 6 Planting soil particle radius model

身的粘附特性,粘连模型受力规律符合 JKR 理论,因此选择 Hertz – Mindlin with JKR 模型为宁前胡根茎和种植土壤的离散元复合模型,JKR 粘结参数可代表根土之间的粘结力,模型中的微观各项参数通过参考文献得出。为了减少参数标定,查阅文献[21]设置土壤之间的法向和切向粘结刚度为 5.3×10^7 N/m,通过查阅文献[6,8,11,21]可得接触参数,根茎-土壤的法向和切向刚度为 3.4×10^7 N/m、临界法向和切向应力为 2.7×10^6 N/m,JKR 表面能和粘结半径分别为 4.5 J/m² 和 8.55 mm,碰撞恢复系数为 0.3,静摩擦因数为 0.4,滚动摩擦因数为 0.13。土壤之间的 JKR 表面能和粘结半径分别为 6 J/m² 和 8.55 mm,碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数,笔者在研究宁前胡除草时已完成^[22]。

土壤间的临界剪切应力可以通过三轴压缩试验间接获得,通过三轴压缩试验获得土壤的粘聚力和内摩擦角,根据土壤抗剪强度理论计算出最大剪切应力。本试验采用南京土壤仪器厂有限公司生产的 TSZ-1 型应变控制式三轴仪,土壤三轴试验依据标准是 GB/T 50123—2019,其中应变控制式三轴仪技术条件符合标准 GB/T 15406—94,仪器设备的校准包括孔隙压力量测系统的气泡排除、橡皮膜的检查,按 SL 118—95 标准进行。试验前先配制好土样,用削土刀切取较大尺寸的土柱,上下两端削平,放入筒壁涂有凡士林的击样筒中,防止水分蒸发,并击锤进行分层压实,制成土力学标准圆柱体试件(直径为 39 mm、高为 80 mm),用套筒将土样包裹入橡皮膜内,并放入压力室的底座上,打开孔隙压力阀,让水管中的气泡从压力室底座排出,并保证排水管路通

畅,打开进水阀,使压力室底座充满水,装上压力筒,并保证传力杆底部与土样对齐。然后进行抽气,抽气结束后打开周围压力阀,分别施加围压 100、200、300、400 kPa,剪切速率设定为 0.8 mm/min。先保持围压不变,然后对土样施加轴压,土样受到剪切破坏,直到试件完全破裂或滑移散掉为止,通过三轴试验获得土壤样本的粘聚力和内摩擦角分别为 13.98 kPa、14.33°,根据土壤抗剪强度理论,得出土壤临界应力为 1.1×10^5 Pa。最终得出 JKR 表面粘结参数如表 1 所示,仿生铲刀具与土壤之间的接触参数如表 2 所示。

表 1 表面粘结接触参数
Tab.1 JKR surface bond contact parameters

参数	根茎-土壤	土壤-土壤
法向刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	3.4×10^7	5.3×10^7
切向刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	3.4×10^7	5.3×10^7
临界法向应力/Pa	2.7×10^6	1.1×10^5
临界切向应力/Pa	2.7×10^6	1.1×10^5
JKR 表面能/($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)	4.5	6.0
JKR 粘结半径/mm	8.55	8.55
碰撞恢复系数	0.3	0.6
静摩擦因数	0.4	0.5
滚动摩擦因数	0.13	0.16

表 2 刀具-土壤接触参数
Tab.2 Tool – soil contact parameters

参数	数值
刀具密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 850
刀具剪切模量/Pa	8.24×10^7
刀具泊松比	0.28
土刀之间恢复系数	0.5
土刀之间静摩擦因数	0.5
土刀之间滚动摩擦因数	0.05

为减小仿真周期,参考宁前胡种植农艺要求,设置仿真区域长×宽×高为1 400 mm×1 000 mm×300 mm,生成方式选择 Dynamic;宁前胡根茎按照种植间距要求垂直落入土壤中,数量为3株;颗粒工厂中土壤颗粒总数量为1 500 000个,土壤颗粒数目按照筛分结果的颗粒占比分别为254 400、314 100、321 150、287 250、323 100个,得到根土离散元复合模型如图7所示。

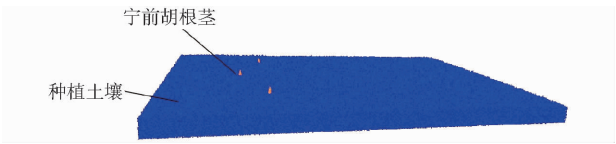


图7 宁前胡根茎-种植土壤离散元复合模型
Fig.7 Discrete meta-composite model for rhizome - planting soil of Ning-guo *Radix peucedani*

2 宁前胡仿生挖掘铲设计

鲨鱼作为游泳速度快的中大型海洋鱼类,经过了数亿年的自然进化和选择,鲨鱼背鳍的形状与其他鱼鳍的形状相比,有着无可比拟的优势,在游动时具有保持平衡稳定的功能,其背鳍在水中能提供良好的流线型,在高速前进时,能降低阻力,因此对鲨鱼背鳍的形态进行仿生。由于在采挖过程中挖掘铲被土壤覆盖,根据摩尔-库伦理论中土体应力分析

$$\begin{cases} \sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos(2\omega) \\ \tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin(2\omega) \end{cases} \quad (1)$$

式中 σ ——法向应力,Pa
 τ ——剪应力,Pa
 σ_1 ——最大主应力,Pa
 σ_3 ——最小主应力,Pa
 ω ——破裂面与最小主应力之间的夹角,(°)

如图8所示,参考图8a,相对于平面铲在挖掘过程中土壤破裂程度较小,根茎两侧土壤呈大体积的土块,当选用鲨鱼背鳍结构作为仿生铲的凸起结构时,仿生铲在挖掘过程中 ω 增大,仿生铲凸起结构使根茎两侧的土壤应力发生变化,根茎两侧的土壤更易达到破裂状态,从而达到减小阻力的效果,土壤破裂也有利于后续对宁前胡根茎的筛分。且鲨鱼背鳍外轮廓具有良好的流线型,能很好地切断土壤,背鳍两侧能对破裂的土壤起到良好的引流作用,在碎土的同时,仿生铲凸起结构受整机振动导致侧歪的现象减少,工作稳定性有所提高,避免工作过程中因整机振动导致侧歪而增大整机能耗问题,还可以避免对根茎的损伤,因此,选用鲨鱼背鳍形状进行仿生挖掘铲的结构设计。

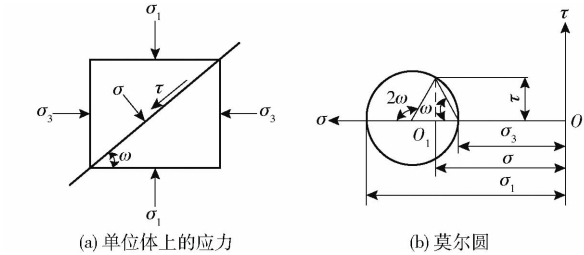


图8 土体应力分析

Fig.8 Soil stress analysis

2.1 鲨鱼背鳍三维结构

将鲨鱼标本放至扫描区域内,并在其周围粘贴定位贴纸,用于尺寸定位,如图9a所示。由于本试验的目的是获得鲨鱼背鳍的三维图形,只需对样本中背鳍位置多角度旋转扫描,确保能得到完整的点云数据即可,如图9b所示。再将扫描得到的13 841个点云数据导入Geomagic studio 2013中进行后处理,对断开组件进行连接,通过降噪功能,对于点云中的每个点,计算其周围一定半径内的点的标准差,利用压缩扫描点云的上下偏差削减噪声,可以更好地反映物体的真实形状,再通过多边形编辑中的填充功能对孔进行填充,利用去除特征将多边形的凹凸去除,并通过快速平滑功能去除表面不规则特征,对局部不平整的表面通过砂纸功能进行打磨,最终生成一个封闭的、光顺的多边形模型,鲨鱼背鳍三轴尺寸(长×宽×高)为89.1 mm×20.5 mm×74.2 mm,如图9c所示。

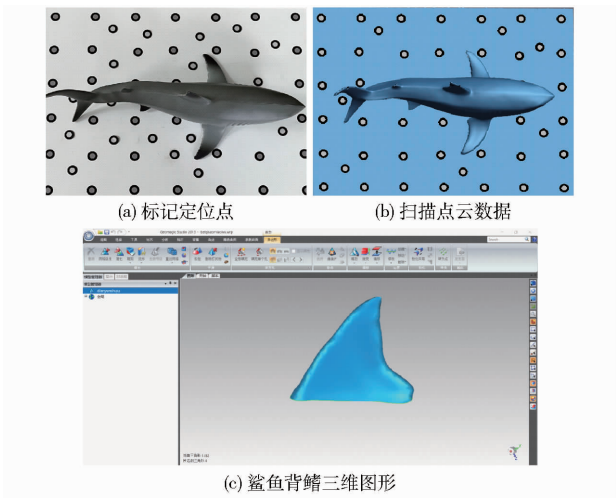


图9 鲨鱼背鳍三维扫描建模过程

Fig.9 3D scanning model process of shark dorsal fin

2.2 仿生挖掘铲结构设计

平面挖掘铲在挖掘过程中,由于土壤附着在挖掘铲上,导致采挖过程中阻力全部集中在铲面上且碎土效果差。鲨鱼的背鳍结构在游动过程中可以使水沿着背鳍两侧流动,以达到减小阻力的效果,参考鲨鱼背鳍几何结构,并结合宁前胡挖掘过程中要求

宁前胡根须的完整性,设计仿生挖掘铲尺寸(长×宽×厚)为 110 mm×90 mm×8 mm,总幅宽为 810 mm,铲片数为 9,铲刃张角为 45°,厚度为 8 mm,将三维扫描获得的鲨鱼背鳍三维结构模型应用在铲面上,作为仿生挖掘铲的凸起结构,如图 10 所示,并对铲尖进行倒斜角,斜角边长为 2 mm,铲厚经切削减小,可以增大根土混合物上的压强,使土块更易破碎。

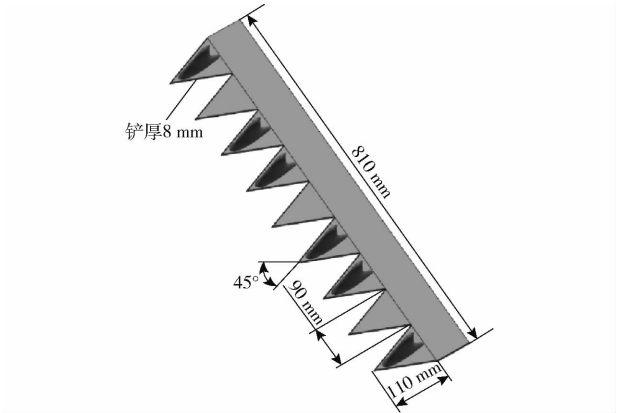


图 10 仿生铲三维模型
Fig. 10 Bionic shovel 3D model

3 挖掘铲力学分析

3.1 挖掘三面楔原理分析

在宁前胡的挖掘过程中,阻力的大小受挖掘铲几何形状、挖掘深度和挖掘铲入土角度的共同影响,且收获过程中约 67% 的功率消耗于挖掘阻力^[23];通过分析发现,其符合三面楔受力原理^[24],简化挖掘铲模型,建立力学原理分析图,如图 11 所示。

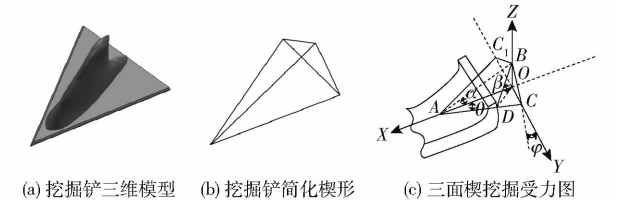


图 11 挖掘铲三面楔原理分析

Fig. 11 Analysis of principle of three-sided wedge of excavator

分析图 11 中的受力关系,得出

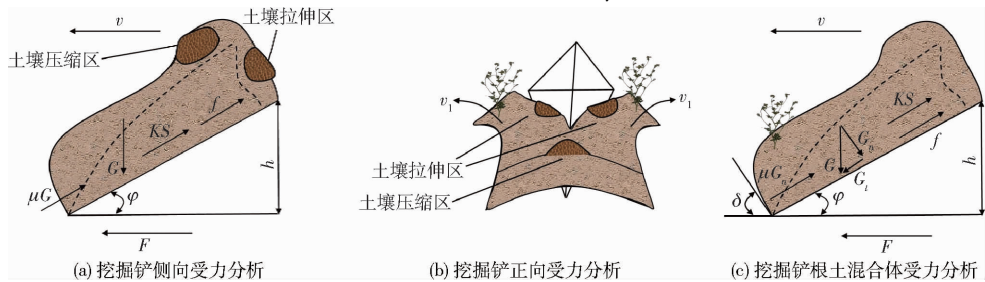


图 12 挖掘铲受力分析

Fig. 12 Analysis of forces on digging shovel

$$\begin{cases} \tan\alpha = \frac{l_{OB}}{l_{OA}} \\ \tan\beta = \frac{l_{OD}}{l_{OD}} \\ \sin\theta = \frac{l_{OD}}{l_{OA}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \tan\theta = \frac{l_{OC}}{l_{OA}} \\ \tan\varphi = \frac{l_{OB}}{l_{OC}} \end{cases} \quad (4)$$

联立式(3)、(4)计算可得

$$\tan\alpha = \tan\varphi \tan\theta \quad (5)$$

- 式中 α ——切土载荷角, (°)
 β ——切土楔角, (°)
 θ ——铲面斜角, (°)
 φ ——入土角, (°)
 l_{OA} ——O、A 两点之间的距离, mm
 l_{OB} ——O、B 两点之间的距离, mm
 l_{OC} ——O、C 两点之间的距离, mm
 l_{OD} ——O、D 两点之间的距离, mm

综上,切土载荷角 α 直接受切土楔角 β 和铲面斜角 θ 的影响,根据三面楔形对土壤的作用,影响挖掘阻力的因素为切土载荷角 α 、铲面斜角 θ 和入土角 φ 。

3.2 挖掘铲铲面受力分析

挖掘是为了克服根茎与土壤之间的粘结,导致粘结键间产生分离、断裂、破碎等现象,故需建立挖掘铲面的力学模型,分析挖掘阻力来源,如图 12 所示。

由图 12a 得出挖掘铲侧向力学平衡方程式

$$F = G \sin\varphi + (\mu G + KS + f) \cos\varphi \quad (6)$$

- 式中 F ——挖掘阻力, N
 G ——挖掘铲上方根土混合物重力, N
 K ——土壤附着力, MPa
 S ——挖掘铲工作接触面积, mm²
 f ——纯切削力, N
 μ ——土壤内摩擦因数

由图 12c,对挖掘铲上方的根土混合体进行受力分析,得水平方向受力方程

$$G_n \cos \delta + (KS + f + \mu G_n) \cos \varphi + KS \sin \delta - G_i \cos \varphi - \mu G_n \cos \delta = 0 \tag{7}$$

式中 G_n ——挖掘铲法向载荷,N
 G_i ——挖掘铲横向载荷,N
 δ ——前失效面倾角,(°)

垂直方向受力方程

$$G + (\mu G_n + KS + f) \sin \varphi + KS \cos \delta + \mu G_n \sin \varphi - G_n \sin \delta = 0 \tag{8}$$

由式(6)~(8)联立,得出挖掘铲在土壤中运动时的阻力为

$$F = \frac{G}{Z} + \frac{KS + f}{Z(\sin \delta + \mu \cos \delta)} + \frac{KS}{Z(\sin \varphi + \mu \cos \varphi)} \tag{9}$$

其中 $Z = \frac{\cos \varphi - \mu \sin \varphi}{\sin \varphi + \mu \cos \varphi} + \frac{\cos \delta - \mu_1 \sin \delta}{\sin \delta + \mu_1 \cos \delta} \tag{10}$

式中 μ_1 ——土壤与金属摩擦因数
 h ——挖掘深度,mm
 Z ——常数

通过对宁前胡挖掘过程中挖掘铲和根土混合物建立力学模型及受力分析可知,挖掘铲的阻力主要受到挖掘铲几何结构参数、土壤物理特性参数、工作参数等因素的影响。

对阻力 F 进行求导

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \delta} = -\frac{KS + f}{Z(\sin \delta + \mu \cos \delta)^2}(\cos \delta - \mu \sin \delta) = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \varphi} = -\frac{KS}{Z(\sin \varphi + \mu \cos \varphi)^2}(\cos \varphi - \mu \sin \varphi) = 0 \\ \left(0 \leq \delta \leq \frac{\pi}{2}, 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \tag{11}$$

可得 φ 和 δ 越靠近 45°时挖掘阻力 F 越小,参考文献[25]得前失效面倾角 δ 范围为 28°~35°,入土角 φ 范围为 16°~30°,参考不同铲面倾角对挖掘阻力的影响规律曲线,并结合常见根茎类中草药材铲面倾角设计范围^[26],设定宁前胡挖掘铲入土倾角为 17°。

4 仿真试验

目前宁前胡收获机械多为平面挖掘铲,由于制造工艺和受力分析简单,且影响因素少,为充分体现仿生挖掘铲的结构优势,对两种铲型进行仿真对比试验。为减小试验误差,仿生挖掘铲与平面挖掘铲的设计尺寸基本一致,平面挖掘铲设计尺寸(长×宽×厚)为 110 mm×90 mm×8 mm,铲刃张角为 45°,总幅宽为 810 mm,铲片数为 9,铲尖斜角边长为 2 mm。用 NX12.0 进行建模,结果如图 13 所示。

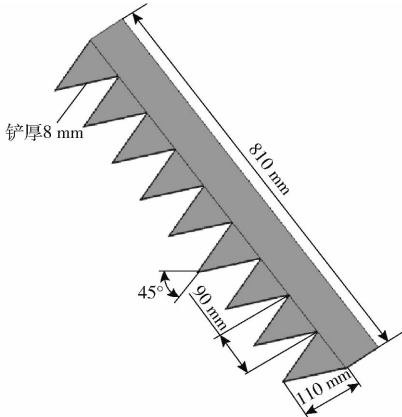


图 13 平面挖掘铲三维模型

Fig. 13 3D model of a flat digging shovel

4.1 挖掘过程对比试验

模拟宁前胡挖掘收获工作过程开展仿真试验,0~4.2 s 设置物理特征参数和 Bonding 模型中的微观参数,生成根土混合物离散元模型;将挖掘铲的三维模型以 STL 格式导入 EDEM 2020 中,参考常见根茎类中药材收获机工作参数,并结合宁前胡收获工艺要求和仿真计算速率,设置挖掘铲入土角为 17°、挖掘深度为 200 mm,并对挖掘铲添加 Linear-Translation 直线运动,设置速度为 0.8 m/s,时长为 1.7 s,仿真总时长为 4.2~5.9 s。为便于观察,对仿真试验结果进行剖切观察,如图 14 所示。

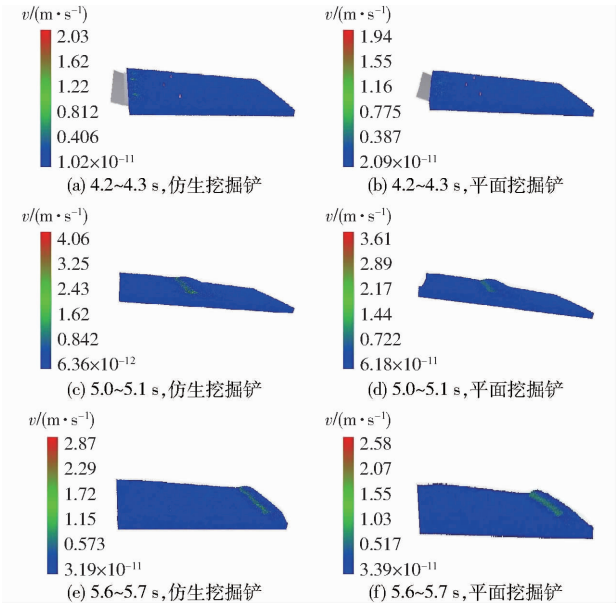


图 14 挖掘仿真试验剖视图

Fig. 14 Cutaway views of simulated excavation comparison test

由图 14 可知,在挖掘铲铲尖部分刚入土时,土壤由于受到剪切力和挤压力开始出现扰动现象;当挖掘铲完全进入土壤时,铲尖对土壤进行剪切破坏,土壤被挤压且沿铲面向上移动,挖掘铲作业前位置出现较明显的土壤隆起;随着挖掘过程的持续,土壤

颗粒继续沿铲面上移到离地面一定高度,由于重力作用回填挖掘铲工作过程形成的坑形扰动区域,且与平面铲相比,仿生铲周边的土壤颗粒移动速度更快,对土壤的扰动和分解效果优于平面铲,铲面所承载的土壤颗粒数量减少,壅土现象减少,从而减小挖掘阻力。

4.2 位移流向对比试验

在仿真挖掘对比试验中可以得出,仿生铲周边的土壤颗粒移动速度优于平面铲,挖掘铲在根土离散元复合模型中连续工作时,土壤颗粒经过挤压、破碎后,得到一定的加速度,在挖掘铲周围移动产生位移,仿生挖掘铲的凸起结构能够使土壤沿着挖掘铲的运动方式由平面挖掘铲的滑动接触改为滚动接触,可以减少土壤与铲面的粘附力与摩擦力,具有良好的土壤流动性和结构引流作用,挖掘铲铲面所承载的土壤颗粒数量减少,可以减少壅土现象,从而减小挖掘铲的挖掘阻力;因此在仿真试验中,土壤颗粒位移流动可以间接反映离散元模型受力后的变化情况,可作为挖掘铲铲面结构优良的评价方法之一。对两种挖掘铲铲面上的土壤颗粒进行位移流向分析,计算在受力后颗粒三轴方向上的平均位移,对比两种挖掘铲铲面结构对根土离散元复合模型的颗粒位移作用,作为挖掘铲减阻的依据。观察在不同铲型工作情况下,根茎在三轴方向上的位移流向,减小在挖掘后根茎易被土壤掩埋的现象,有利于后续对根茎的筛分。

4.2.1 宁前胡根茎位移流向对比试验

宁前胡在采挖时,由于土壤的粘结和工作速度的双重作用,使其在被挖掘铲挖起后,沿铲面向后移动,造成根土之间产生拉伸、挤压和剪切破碎现象,导致土壤断裂破碎,根茎产生滑移,示意图如图 15 所示。

在 EDEM 后处理 Analyst 功能中导出数据,将其数据导入 Origin 2020 中,分析得出 4.2 ~ 5.9 s 的时间-位移曲线,如图 16 所示。选取其中一片铲面进行位移分析,分析可知平面挖掘铲挖掘时宁前胡根

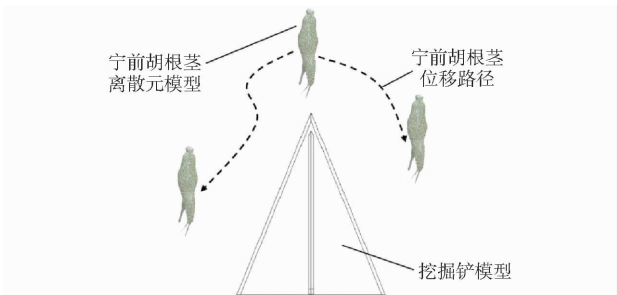


图 15 仿真试验根茎位移流向示意图
Fig. 15 Schematic of displacement flow of rootstock in simulation test

茎位移主要在 X 向和 Z 向,平均位移分别为 72.28、81.72 mm, Y 向的位移变化不大,为 52.81 mm;仿生挖掘铲挖掘时宁前胡根茎在 X、Y、Z 方向上都有较好的位移表现,且随仿真时间的增长位移变化逐渐增大, X、Y、Z 方向的平均位移分别为 80.90、87.20、110.04 mm。

4.2.2 土壤颗粒位移流向对比试验

在 EDEM 后处理 Analyst 功能中导出数据,将其导入 Origin 2020 中,分析得出 4.2 ~ 5.9 s 的时间-位移曲线,如图 17 所示。对比分析土壤 X 向位移(图 17a)可知,平面挖掘铲和仿生挖掘铲 X 向的平均位移分别为 165.98 mm 和 182.95 mm,挖掘铲在 4.25 s 进入土壤后,土壤颗粒逐渐开始累积并抖动上升。对比平面挖掘铲和仿生挖掘铲的 Y、Z 方向上的位移(图 17b、17c)可知,仿生挖掘铲的优势逐渐开始体现,无论是 Y 向还是 Z 向的平均位移,仿生挖掘铲皆优于平面挖掘铲,其中 Y 向平均位移分别为 110.08 mm 和 84.04 mm, Z 向平均位移分别为 181.38 mm 和 159.21 mm;在 Y 向 5 ~ 5.9 s 连续工作过程时,由于土壤颗粒沿着仿生挖掘铲铲面流动幅度较大,其位移曲线变化相对于平面挖掘铲上升速度更快,能有效降低壅土现象的发生;在 Z 向 4.4 ~ 4.7 s,挖掘铲在刚入土阶段,土壤颗粒运动速度逐渐加快,位移曲线出现较大幅度增长,但在 5 s 以后,由于入土角度和铲体长度的限制,其位移曲线变化逐渐平稳。从土壤颗粒的 3 个方向上位移运动变

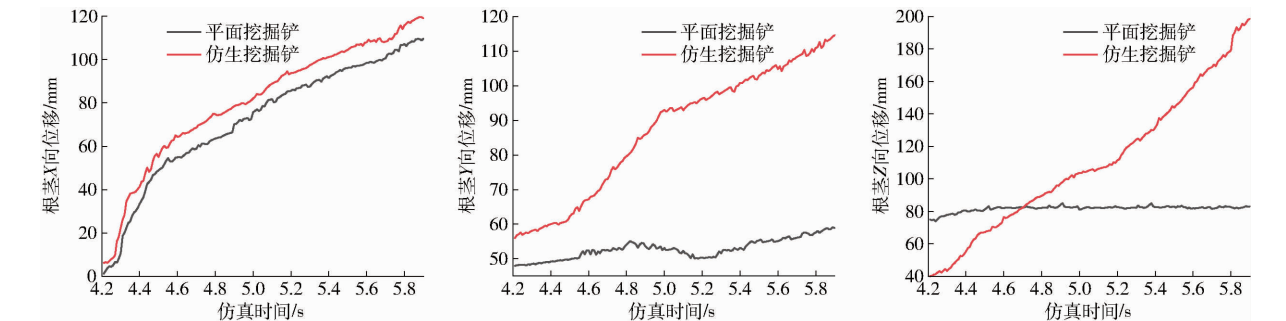


图 16 根茎位移仿真曲线
Fig. 16 Rootstock displacement simulation curves

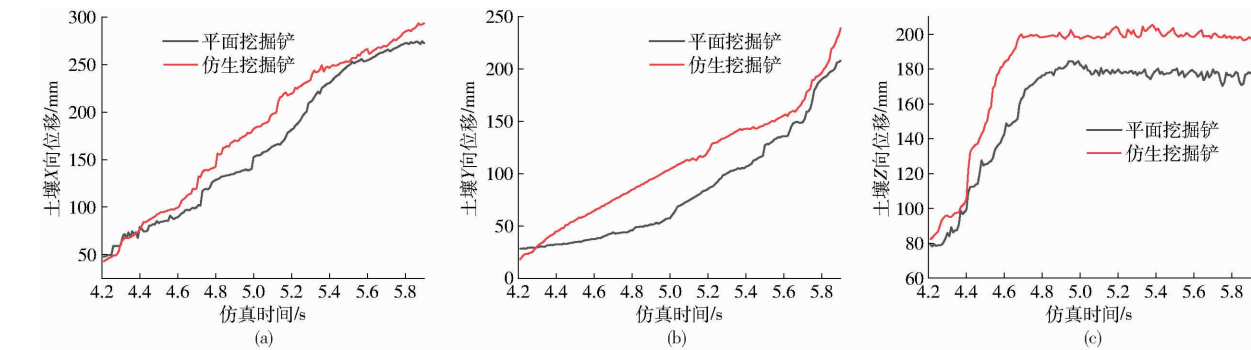


图 17 土壤颗粒位移仿真曲线

Fig. 17 Soil particle displacement simulation curves

化趋势来看,仿生挖掘铲铲面的颗粒流动性优于平面挖掘铲铲面。

4.3 挖掘铲阻力对比试验

根据公式(9)可知,挖掘铲阻力主要受土壤附着力、根土粘结力、入土角度和挖掘铲前进速度等因素共同影响,通过仿真试验可以得出挖掘阻力主要在 X 方向,利用 EDEM 后处理 Analyst 模块导出挖掘铲 X 向阻力数据,再导入 Origin 2020 中得出 4.2 ~ 5.9 s 的阻力曲线,如图 18 所示。

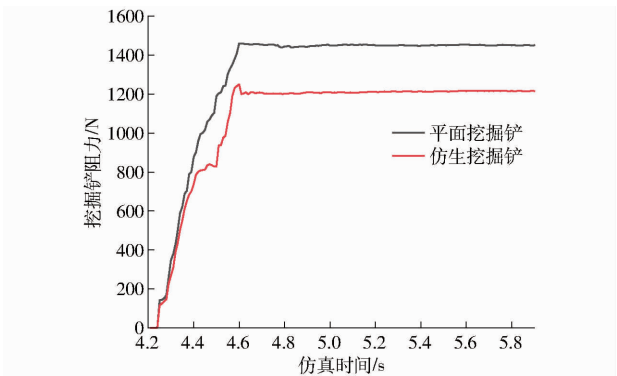


图 18 挖掘铲阻力仿真曲线

Fig. 18 Simulation curves of resistance of digging shovel

平面挖掘铲 4.25 s 时刚进入土壤,挖掘阻力开始波动,4.3 s 时开始深入土壤,挖掘阻力急剧增加,4.6 s 时达到峰值 1 460.5 N,4.6 s 后进入连续工作状态,阻力逐渐平稳;仿生挖掘铲在 4.5 ~ 4.6 s 时,由于铲体结构的作用,阻力出现先上升后下降再上升的现象,在 4.6 s 时阻力达到峰值1 250.6 N,4.6 s 后趋于稳定;与平面挖掘铲相对比分析,仿生挖掘铲的减阻率为 14.37%。

5 试验

5.1 试验条件及设备

仿生挖掘铲与平面挖掘铲的土槽试验场地为安徽农业大学安徽省智能农机装备工程实验室,试验设备为室内数字化小型土槽试验台。主要由试验台主框架、抽拉式土箱、导轨、齿轮链条机构、驱动电

机、触土部件工作行架、三向力传感器、控制系统部分组成。室内土槽长为 2.5 m,宽为 0.9 m,高为 0.65 m,挖掘铲入土深度和铲面倾角由安装架上的调节槽及锁紧螺栓调节,土层深度为 300 mm,如图 19 所示,其中挖掘铲实物图如图 20 所示。

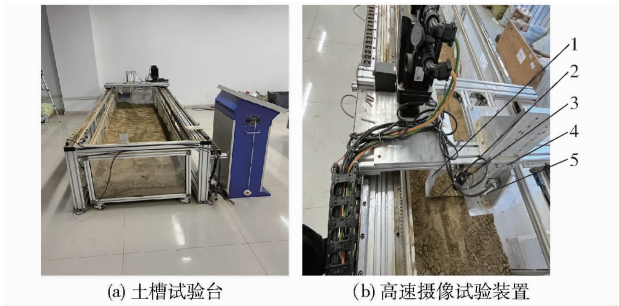


图 19 土槽试验装置

Fig. 19 Soil trough test set-up

1. 入土角度调节槽 2. 挖掘铲 3. 高速摄像机 4. 入土深度调节槽 5. 三向力传感器



图 20 挖掘铲实物图

Fig. 20 Physical drawings of excavating shovel

行架工作速度由驱动电机控制和调节,速度调节范围为 1 ~ 2 000 mm/s,调节精度为 1 mm/s。工作过程中土壤颗粒位移流向采用高速摄影系统进行实时拍摄和记录。土壤试验过程中挖掘铲刀具的切削力通过三向力传感器及试验台数据采集系统实时采集,传感器测量范围为 1 ~ 3 000 N,精度为 1 N,数据采集频率为 40 次/s。

为保证与仿真模型的一致性,土壤内的试验用

土取自安徽省宁国市前胡种植基地,进行土槽试验前,需对试验用土进行处理,经过洒水、旋耕碎土、击打压实等步骤,并按宁前胡种植农艺要求埋入宁前胡根茎,设置行架工作速度为 0.8 m/s,挖掘深度为 200 mm,入土角为 17°,工作时长 2 s。

5.2 土槽试验

5.2.1 宁前胡根茎挖掘效果对比试验

为验证仿生挖掘铲的挖掘效果,在埋入宁前胡根茎的土槽试验台中,利用两种铲型的挖掘铲进行挖掘试验,挖掘试验后对比效果如图 21 所示,通过根茎是否被土壤掩埋和根茎离土层表面的距离分析,与仿真试验中得出的宁前胡根茎在仿生挖掘铲挖掘后,根茎在 Z 方向上有更好的位移表现基本一致。

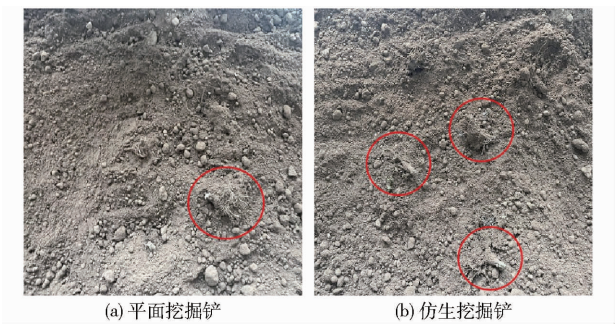


图 21 挖掘效果试验对比

Fig. 21 Comparison experiment charts of excavation effect

5.2.2 挖掘铲阻力对比试验

通过三向力传感器以及试验台数据采集系统获得 X 方向上挖掘铲阻力峰值数据,重复进行 10 组试验,阻力平均值和减阻率如表 3 所示。在工作过程中,试验台数据采集系统可获得不同铲型的挖掘铲力与时间之间的关系,如图 22 所示。

表 3 土槽对比试验阻力测量结果

Tab. 3 Resistance measurements result for soil trench comparison tests			
试验序号	仿生挖掘铲 阻力 F_1 /N	平面挖掘铲 阻力 F_2 /N	减阻率 η /%
1	1 363.3	1 603.4	14.97
2	1 346.2	1 598.7	15.79
3	1 331.6	1 632.6	18.44
4	1 352.4	1 614.5	16.23
5	1 387.7	1 589.8	12.71
6	1 323.5	1 609.6	17.77
7	1 371.8	1 611.3	14.86
8	1 322.4	1 646.4	19.68
9	1 308.7	1 661.2	21.22
10	1 315.2	1 659.8	20.76
均值	1 342.28	1 622.73	17.28

由表 3 可知,仿生挖掘铲的平均阻力为 1 342.28 N,平面挖掘铲的平均阻力为 1 622.73 N,

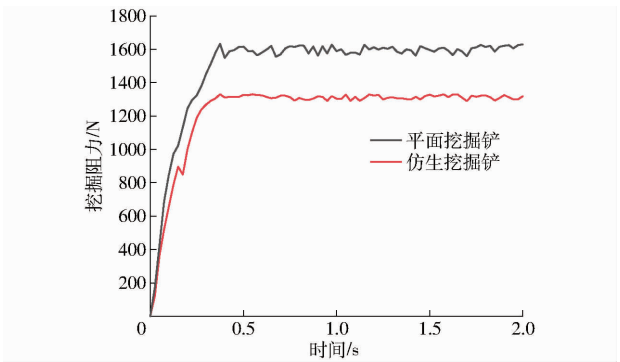


图 22 挖掘阻力试验曲线

Fig. 22 Excavation resistance test curves

通过计算,得出平均减阻率为 17.28%,且与仿真试验得到的减阻率 14.37% 相比,误差在可控范围内,验证了仿生挖掘铲的减阻效果优于平面挖掘铲。

6 结论

(1) 针对宁前胡采挖过程中挖掘阻力大的问题,以宁前胡根茎和种植土壤作为试验材料,测量其物理参数,采用三维扫描仪扫描获得根茎外形轮廓特征,并创建三维模型;根据摩尔-库仑理论中土体应力分析,仿生铲的凸起结构可以使土壤更易达到破裂状态;通过三维扫描仪扫描鲨鱼标本,获得背鳍三维模型图,确定仿生铲三维模型中的结构曲线,并利用 NX12.0 建立仿生挖掘铲的三维模型。

(2) 由离散元仿真对比试验可知,土壤颗粒在经过挤压、破碎后,得到一定的加速度,在挖掘铲周围移动产生位移,仿生挖掘铲的凸起结构能够使土壤沿着挖掘铲的运动方式由平面挖掘铲的滑动接触改为滚动接触,可以减少土壤与铲面的粘附力与摩擦力,具有良好的土壤流动性和结构引流作用,土壤颗粒位移在三轴方向上优于平面挖掘铲,挖掘铲铲面所承载的土壤颗粒数量减少,可以减少壅土现象,从而减小挖掘铲的挖掘阻力,平均减阻率为 14.37%,且仿生挖掘铲的根茎位移在三轴方向上优于平面挖掘铲,可以减小在挖掘后根茎易被土壤掩埋的现象,有利于后续对根茎的筛分。

(3) 通过土槽试验对比根茎挖掘效果,与仿真试验中得出的宁前胡根茎在仿生挖掘铲挖掘后,根茎在 X、Y、Z 3 个方向上有更好的位移表现基本一致;利用三向力传感器获得挖掘阻力,得出仿生挖掘铲平均挖掘阻力为 1 342.28 N,平面挖掘铲平均挖掘阻力为 1 622.73 N,平均减阻率为 17.28%,与仿真试验减阻率 14.37% 相比误差较小,证明了所建立的离散元模型可靠,仿生挖掘铲的结构设计合理,可以达到宁前胡采挖过程中的减阻要求。

参考文献

- [1] PARK H J, JEONG J H, PARK S H. The root extract of *Peucedanum praeruptorum* dunn exerts anticancer effects in human non-small-cell lung cancer cells with different EGFR mutation statuses by suppressing MET activity[J]. *Molecules*, 2022, 27(7): 2360.
- [2] OLENNIKOV D N. New coumarins from roots and fruit of *Peucedanum morisoi*[J]. *Chemistry*, 2022, 58(5): 816–821.
- [3] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(4): 1–20.
- ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of application of discrete element method in agricultural engineering[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(4): 1–20. (in Chinese)
- [4] 杨玉婉, 佟金, 马云海, 等. 鼯鼠多趾结构特征仿生旋耕刀设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(19): 37–45.
- YANG Yuwan, TONG Jin, MA Yunhai, et al. Design and experiment of bionic rotary tillage knife with multi-toe structural features of mole[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(19): 37–45. (in Chinese)
- [5] 俞杰. 基于家兔爪趾结构的旋耕刀仿生设计[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
- YU Jie. Bionic design of rotary tillage knife based on paw-toe structure of domestic rabbit[D]. Changsha: Central South University of Forestry Technology, 2020. (in Chinese)
- [6] 肖茂华, 汪开鑫, 杨望, 等. 基于东方蝾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)
- [7] 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 and bionic shovel design based on discrete element method[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [8] 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 Zhaoguo, 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)
- [9] 程一启, 张兆国, 张丹, 等. 基于 EDEM 三七收获机组合式挖掘铲减阻效果研究[J]. *农机化研究*, 2019, 41(2): 55–60.
- CHENG Yiqi, ZHANG Zhaoguo, ZHANG Dan, et al. Study on the effect of drag reduction of combined excavating shovel based on EDEM *Panax notoginseng* harvester[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 41(2): 55–60. (in Chinese)
- [10] 祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 340–347.
- QI Yingchun, WANG Yiquan, LIU Jun, et al. Soil agglomerate composition and several agglomerate stability indicators for different land use patterns[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1): 340–347. (in Chinese)
- [11] 丁启朔, 任骏, BELAL Eisa Adam, 等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(3): 38–48.
- DING Qishuo, REN Jun, BELAL Eisa Adam, et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3): 38–48. (in Chinese)
- [12] 张锋伟, 宋学锋, 张雪坤, 等. 玉米秸秆揉丝破碎过程力学特性仿真与试验[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(9): 58–65.
- ZHANG Fengwei, SONG Xuefeng, ZHANG Xuekun, et al. Simulation and experiment on mechanical characteristics of corn straw kneading and crushing process[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(9): 58–65. (in Chinese)
- [13] 刘宏俊, 张文毅, 纪要, 等. 基于离散元法的稻麦周年地区土壤仿真物理参数标定[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(12): 153–159.
- LIU Hongjun, ZHANG Wenyi, JI Yao, et al. Physical parameters of soil simulation based on discrete element method in rice-wheat anniversary region[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(12): 153–159. (in Chinese)
- [14] 曹晓兴. 逆向工程模型重构关键技术及应用[D]. 郑州: 郑州大学, 2012: 11–13.
- CAO Xiaoxing. Key technologies and applications of reverse engineering model reconstruction[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012: 11–13. (in Chinese)
- [15] 金涛, 陈建良, 童水光, 等. 逆向工程技术研究发展[J]. *中国机械工程*, 2002, 21(16): 86–92.
- JIN Tao, CHEN Jianliang, TONG Shuguang, et al. Reverse engineering research and development[J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, 21(16): 86–92. (in Chinese)
- [16] 刘彩玲, 王亚丽, 宋建农, 等. 基于三维激光扫描的水稻种子离散元建模及试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(15): 294–300.
- LIU Cailing, WANG Yali, SONG Jiannong, et al. Discrete element modeling and experiments on rice seeds based on 3D laser scanning[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(15): 294–300. (in Chinese)
- [17] 于庆旭, 刘燕, 陈小兵, 等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(2): 123–132.
- YU Qingxu, LIU Yan, CHEN Xiaobing, et al. Calibration and experiment of simulation parameters for *Panax notoginseng* seeds based on DEM[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(2): 123–132. (in Chinese)
- [18] 张荣芳, 焦伟, 周纪磊, 等. 不同填充颗粒半径水稻种子离散元模型参数标定[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(增刊1): 227–235.
- ZHANG Rongfang, JIAO Wei, ZHOU Jilei, et al. Parameter calibration and experiment of rice seeds discrete element model with

different filling particle radius[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (Supp. 1): 227 – 235. (in Chinese)

[19] 廖宜涛, 王在腾, 廖庆喜, 等. 果荚初期饲料油菜茎秆离散元接触模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51 (增刊 1): 236 – 243.
LIAO Yitao, WANG Zaiteng, LIAO Qingxi, et al. Calibration of discrete element model parameters of forage rape stalk at early pod stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (Supp. 1): 236 – 243. (in Chinese)

[20] 廖宜涛, 廖庆喜, 周宇, 等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51 (6): 73 – 82.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (6): 73 – 82. (in Chinese)

[21] 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)

[22] 曹成茂, 向旺, 罗坤, 等. 抛推组合式前胡草土分离除草机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54 (3): 106 – 114.
CAO Chengmao, XIANG Wang, LUO Kun, et al. Design and experiment of *Rodix peucedani* weeding machine separating weeds and soil with combination of throwing and pushing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54 (3): 106 – 114. (in Chinese)

[23] 邢欢欢. 基于离散单元法的机械式挖掘机工作阻力模拟[D]. 沈阳: 东北大学, 2014: 10 – 13.
XING Huanhuan. Simulation of mechanical excavator working resistance based on discrete unit method [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014: 10 – 13. (in Chinese)

[24] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 22 – 23.

[25] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册: 上册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.

[26] 陈威, 曹成茂, 张远, 等. 太子参联合收获机挖掘铲的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2021, 56 (4): 178 – 184, 194.
CHEN Wei, CAO Chengmao, ZHANG Yuan, et al. Design and test of digging shovel of *Pseudostellaria heterophylla* combined harvesting machine[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2021, 56 (4): 178 – 184, 194. (in Chinese)

(上接第 60 页)

[24] 贺一鸣, 向伟, 吴明亮, 等. 基于堆积试验的壤土离散元参数的标定[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44 (2): 216 – 220.
HE Yiming, XIANG Wei, WU Mingliang, et al. Parameters calibration of loam soil for discrete element simulation based on the repose angle of particle heap[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2018, 44 (2): 216 – 220. (in Chinese)

[25] 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)

[26] 石林榕, 吴建民, 赵武云, 等. 基于离散单元法农田土壤单轴压缩模型的建立及参数校核[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20 (4): 174 – 182.
SHI Linrong, WU Jianmin, ZHAO Wuyun, et al. Establishment and parameter verification of farmland soil model in uniaxial compression based on discrete element method[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20 (4): 174 – 182. (in Chinese)

[27] 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.
XI Wei, WU Mingliang, LÜ Jiangnan, et al. Calibration of simulation physical parameters of clay loam based on soil accumulation test[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35 (12): 116 – 123. (in Chinese)

[28] HANG C G, GAO X J, YUAN M C, 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.

[29] 刘坤宇, 苏宏杰, 李飞宇, 等. 基于响应曲面法的土壤离散元模型的参数标定研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42 (9): 143 – 149.
LIU Kunyu, SU Hongjie, LI Feiyu, et al. Research on parameter calibration of soil discrete element model based on response surface method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42 (9): 143 – 149. (in Chinese)