

胡萝卜联合收获机高效减阻松土铲设计与试验

王金武 李响 高鹏翔 那明君 王奇 周文琪

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对胡萝卜联合收获机作业时松土铲普遍存在作业阻力大、漏拔率高等问题,设计了一种高效减阻松土铲。以狗獾爪趾为仿生原型设计了仿生减阻铲尖,并分析了其减阻机理,建立了铲翼与土壤间的力学接触模型,确定了影响松土铲作业质量的铲翼结构参数。基于 EDEM 离散元仿真技术,建立了部件-土壤-作物多元仿真模型,通过单因素试验与正交旋转组合试验,确定了铲翼结构参数取值范围及其对指标的影响规律。建立了试验因素与指标间的多目标优化数学模型,运用 Design-Expert 8.0.6 软件确定了松土铲的最优参数组合,通过田间性能试验验证了高效减阻松土铲的作业性能。结果表明:影响胡萝卜联合收获机松土铲作业质量的主要结构参数为铲翼开角 α 和铲翼倾角 β ,当铲翼开角 α 和铲翼倾角 β 分别为 120.27° 和 47.37° 时,松土铲作业性能最优,最优组合下前进阻力与胡萝卜拔取力分别为 $1\,908.76\text{ N}$ 和 55.37 N 。经田间性能试验验证,田间试验结果与仿真优化结果基本一致,与凿式松土铲相比,高效减阻松土铲前进阻力降低了 5.79% ,胡萝卜拔取力降低了 20.68% ,漏拔率降低了 3.8 个百分点,满足胡萝卜收获农艺要求。

关键词: 胡萝卜收获机; 松土铲; 工程仿生技术; 离散元法

中图分类号: S225.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)06-0093-11

OSID:



Design and Experiment of High Efficiency Drag Reducing Shovel for Carrot Combine Harvester

WANG Jinwu LI Xiang GAO Pengxiang NA Mingjun WANG Qi ZHOU Wenqi

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to solve the problems of high resistance and high rate of leakage during the operation of carrot combine harvester, a kind of high efficiency drag reducing shovel was designed. The bionic drag reducing shovel tip was designed with the badger claw as the bionic prototype, and its drag reducing mechanism was analyzed. Based on the theoretical mechanics analysis, the mechanical contact model between shovel wing and soil was established. The structure parameters of the shovel wing which affected the quality of shovel were determined. Based on the EDEM discrete element simulation technology, the multi simulation model of component-soil-crop was established. Through the single factor experiment and orthogonal rotation combined experiment, the range of its value and the law of its influence on the index were determined. The multi-objective optimization mathematical model between experiment factors and indexes was established, and the optimal parameter combination of the shovel was determined by using Design-Expert 8.0.6 software. The operation performance of the high efficiency drag reducing shovel was verified by the field performance comparison experiment. The results showed that the main structural parameters that affected the quality of scarification and shoveling operation of carrot combine harvester were the opening angle α and the inclination angle β . When the opening angle α and the inclination angle β were 120.27° and 47.37° respectively, the performance of the shovel was the best, and the forward resistance and extraction power of carrot were $1\,908.76\text{ N}$ and 55.37 N respectively. Compared with the chisel shovel, the resistance of the high efficiency drag reducing shovel was reduced by 5.79% , the extraction power of carrot was reduced by 20.68% , and the leakage rate was reduced by 3.8 percentage points, which met the requirements of carrot harvesting.

Key words: carrot harvester; shovel; engineering bionic technology; discrete element method

收稿日期: 2019-10-28 修回日期: 2019-12-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701305)和国家重点研发计划省级项目(GX18B026)

作者简介: 王金武(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械和机械可靠性研究, E-mail: jinwu@163.com

通信作者: 周文琪(1989—),男,讲师,博士,主要从事田间作业机械研究, E-mail: zhouwenqi1989@163.com

0 引言

我国胡萝卜种植面积和总产量均居世界第一位,但大多数地区的胡萝卜收获仍然采用人工与半机械化结合的收获方式^[1]。人工收获劳动强度大、效率低,半机械化收获经济成本高,因此无法满足胡萝卜规模化收获要求。松土是胡萝卜机械化收获的重要环节,松土质量直接影响前进阻力、漏拔率等技术指标。因此,提升胡萝卜联合收获机松土铲的作业性能是推进胡萝卜机械化收获的有效途径。

目前,国内外学者对胡萝卜联合收获机松土铲鲜有研究。相关研究多对耕地部件深松铲进行结构设计^[2-4],且主要针对深松铲进行结构设计,并未结合胡萝卜生产模式及收获农艺要求研制专用松土铲,常规深松铲适应性较差,影响机具作业质量。

仿生学作为一门新兴工程学科,已在工程领域得到了广泛应用^[5]。张金波等^[6]对小家鼠爪趾曲线进行拟合,设计了刃口为指数函数曲线型的减阻深松铲,试验表明,仿生设计可以显著降低深松铲的耕作阻力,有效提升松土部件的作业性能。

本文基于仿生学原理与部件-土壤间力学模型分析,设计一种高效减阻松土铲。利用离散元法建立部件-土壤-作物多元仿真模型,结合试验优化和回归分析等方法,探究松土铲结构参数对胡萝卜联合收获机松土铲作业质量的影响,以期解决胡萝卜联合收获机松土铲土壤扰动小、前进阻力大和漏拔率高等问题。

1 结构与工作原理

胡萝卜联合收获机松土铲安装位置位于带轮正下方,由仿生铲尖、松土铲翼和破土铲柄组成。破土铲柄位于机具正下方与机架连接,松土铲翼与仿生铲尖位于带轮正下方与铲柄固接,如图1所示。

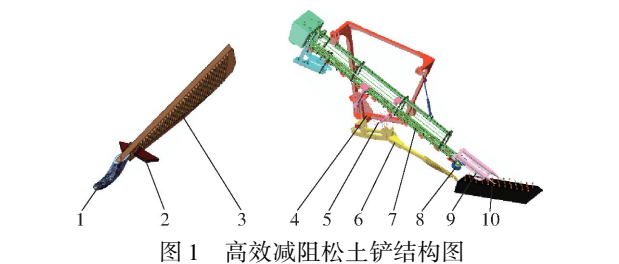


Fig.1 Structure diagram of high efficiency drag reducing shovel
1. 仿生铲尖 2. 松土铲翼 3. 破土铲柄 4. 机架 5. 清土辊
6. 松土铲 7. 输送梁 8. 带轮 9. 扶土器 10. 土壤与胡萝卜

工作时,整机由拖拉机牵引向前运动,松土铲对胡萝卜行间土壤进行扰动,降低胡萝卜与土壤间的

粘附作用。胡萝卜通过扶禾器作用后旋转处于直立状态,并在输送带的作用下,向后方夹持输送,完成胡萝卜松土、挖掘和输送作业。

2 关键部件设计

2.1 仿生铲尖

通过对狗獾前爪趾结构进行研究^[7-9],发现其爪趾尖部呈锥形,狗獾在挖掘土壤过程中,其爪趾的运动方式同松土铲的工作过程极为相似。即以水平运动为主,通过爪趾的移动切碎土壤。因此,以狗獾爪趾作为研究对象,将爪趾相关曲线结构应用于松土铲铲尖的结构设计中。

为精准拟合狗獾爪趾特征,基于逆向工程理论^[10],取狗獾前爪中指利用先临三维公司生产的EinScan Pro 2x 型非接触式三维扫描仪进行扫描,如图2所示。在扫描创建网格阶段,对获得的点云数据依次进行“采样”、“平滑”和“杂点消除”处理,使得点云得到优化进而得到更高质量的点云数据^[11]。在 Geomagic Design X 软件中对优化后的点云模型进行封装和填孔得到狗獾爪趾三维模型,如图3所示。

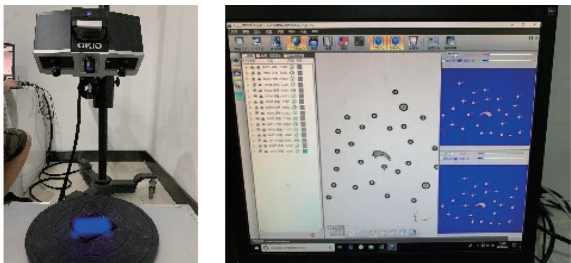


图2 狗獾爪趾取样扫描
Fig.2 Sampling and scanning of badger claw

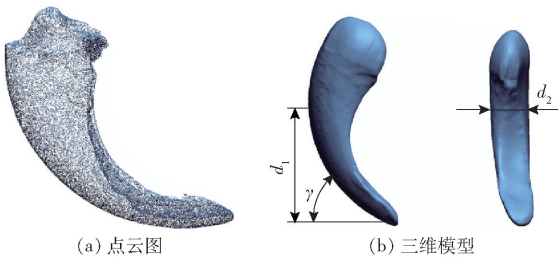


图3 狗獾爪趾点云与三维模型
Fig.3 Point cloud and 3D model of badger claw

为确定狗獾爪趾内侧结构参数,对狗獾爪趾内侧曲线进行提取^[12]。首先,将狗獾爪趾三维模型导入 SolidWorks 软件中,采用手动取点的方式按顺序依次取点,如图4所示,对每个点进行测量,获得其点坐标数据,将所取得的点的位置坐标导入函数绘图软件 Origin Pro 中进行曲线拟合,得到爪趾内侧曲线的拟合方程

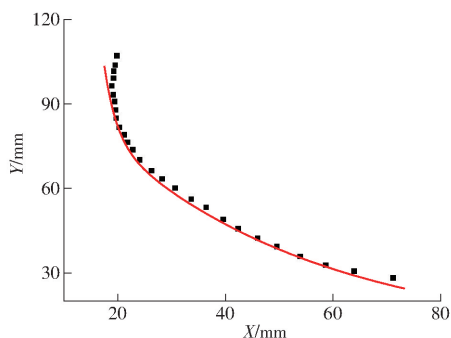


图4 狗獾爪趾内侧拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of inner side of badger claw

$$y = 110.28e^{-x/37.45} + 184853.84e^{-x/2.11} + 10.44 \quad (1)$$

拟合曲线决定系数 $R^2 = 0.95815$ 。

为进一步探究仿生铲尖减阻机理,分别以仿生铲尖(图5a)与凿式铲尖(图5b)为例,对土壤-铲尖进行力学对比分析,如图6所示。

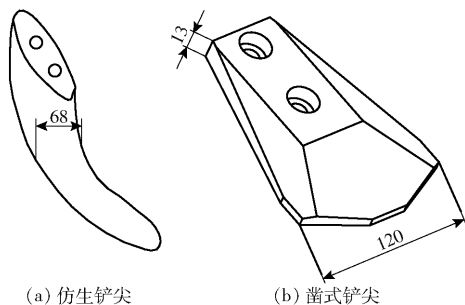


图5 铲尖结构对比简图

Fig. 5 Comparison diagrams of shovel tip structure

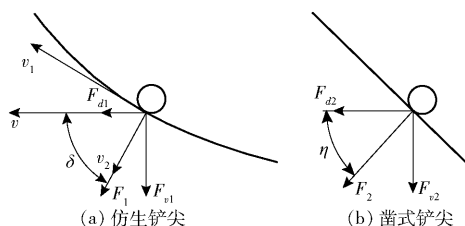


图6 土壤颗粒与松土铲尖力学对比分析

Fig. 6 Comparative analysis of mechanics between soil particles and tip of shovel

以仿生铲尖为例,当土壤颗粒接触铲尖表面时,存在相对速度 v ,其可以分解为切向速度 v_1 与法向速度 v_2 ,法向速度 v_2 全部转化为阻力 F_1 阻碍铲尖向前运动,阻力 F_1 又可分解为水平方向的水平阻力 F_{d1} 与竖直方向的垂直阻力 F_{v1} ,垂直阻力 F_{v1} 对铲尖产生正压力的同时也表现为铲尖所受摩擦力,仿生铲尖前进阻力 F_{f1} 由水平阻力 F_{d1} 和铲尖所受摩擦力的水平分力 F_{f1} 组成。

$$F_1 = ma = m \frac{v_2 - v_0}{t} \quad (2)$$

$$F_{d1} = F_1 \cos \delta = m \frac{v_2 - v_0}{t} \cos \delta = m \frac{v}{t} \cos^2 \delta \quad (3)$$

$$F_{f1} = \mu_1 F_{v1} \sin^2 \delta = \mu_1 F_1 \sin^3 \delta \quad (4)$$

$$F_{f1} = F_{d1} + F_{f1} = \frac{mv \cos \delta}{t} (\mu_1 \sin^3 \delta + \cos \delta) \quad (5)$$

$$v_2 = v \cos \delta \quad (6)$$

其中 m ——颗粒质量,kg

a ——加速度, m/s^2

v_0 ——前进末速度, m/s

t ——作用时间, s

δ ——仿生铲尖速度 v 与法向方向夹角, $(^\circ)$

μ_1 ——铲尖与土壤间摩擦因数

由式(5)可知, $\mu_1 \sin^3 \delta$ 远小于 $\cos \delta$,则式(5)可简化为

$$F_{f1} = m \frac{v}{t} \cos^2 \delta \quad (7)$$

同理凿式铲尖所受前进阻力 F_{f2} 表达式为

$$F_{f2} = m \frac{v}{t} \cos^2 \eta \quad (8)$$

式中 η ——凿式铲尖速度 v 与法向方向夹角, $(^\circ)$

当土壤颗粒开始接触铲尖时 $\delta = \eta$,随着土壤颗粒沿铲尖内侧滑动可得 $\delta > \eta$,即 $F_{f1} < F_{f2}$ 。

根据计算结果,当松土铲尖以相同的速度冲击土壤颗粒,由于仿生铲尖内侧曲线的特殊结构形式,使得土壤颗粒水平初速度 v 在垂直接触点切线方向的分速度所产生的阻力明显小于凿式铲尖,因此,仿生铲尖的土壤阻力要小于其它类型凿式铲尖。

将狗獾爪趾三维模型导入 SolidWorks 软件中,进行等比放大,为保证其工作适应性,根据胡萝卜种植模式与生长特性,并参考现有松土铲结构参数及入土角,放大倍数选取 10 倍,松土铲入土角 $\gamma = 25^\circ$ 。此时,入土高度 $d_1 = 97.8 \text{ mm}$,入土宽度 $d_2 = 68 \text{ mm}$ 。

2.2 松土铲翼

铲翼可以增加土壤扰动范围^[13-14],减小胡萝卜拔取力,但增加铲翼后松土铲前进阻力明显升高。为探究铲翼结构最优参数,建立铲翼与土壤间力学接触模型,对铲翼进行受力分析。在铲翼表面任意一点建立空间直角坐标系 $Oxyz$, y 轴为松土作业时铲翼前进方向, z 轴为竖直方向, x 轴为水平面内与 y 轴垂直方向。分析铲翼与土壤颗粒接触时的受力情况,包括铲翼受到的土壤支持力 N (与 z 轴夹角为 $90^\circ - \alpha/2$)、铲翼受到的土壤摩擦力 f (在 yz 平面上) 和其自身重力 G 。铲翼受到的合力即为铲翼前进阻力 F_y ,方向与其前进方向相反。如图 7 所示,可得平衡方程

$$N \sin \frac{\alpha}{2} \cos \beta + f \sin \beta = G \quad (9)$$

$$f=\mu_2N$$
(10)

$$F_y=f\cos\beta-N\sin\frac{\alpha}{2}\sin\beta$$
(11)

将式(9)和式(10)代入式(11)得

$$F_y=\left(\mu_2\cos\beta-\sin\frac{\alpha}{2}\sin\beta\right)\frac{G}{\sin\frac{\alpha}{2}\cos\beta+\mu_2\sin\beta}$$
(12)

式中 μ_2 ——铲翼与土壤间摩擦因数
 α ——铲翼开角, (°)
 β ——铲翼倾角, (°)

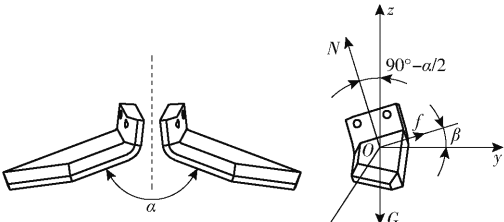


图7 铲翼力学分析

Fig.7 Mechanical analysis of shovel wing

由式(12)可知,松土铲翼前进阻力 F_y 与铲翼开角 α 、铲翼倾角 β 有关,后文将通过 EDEM 仿真试验探究其最优参数组合。

2.3 破土铲柄

铲柄刃口曲线上任意一点的法线与该点运动速度方向之间的夹角定义为滑切角,而滑切作用的大小主要取决于滑切角的选取^[15-16],对铲柄进行力学分析,如图8所示。

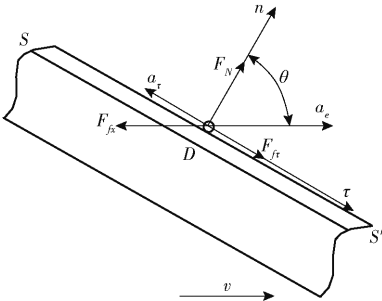


图8 铲柄滑切力学分析

Fig.8 Stress analysis of sliding cutting of shovel handle

铲柄的设计滑切角需大于摩擦角。考虑到滑切角过小滑切效应不明显,滑切角过大会引起铲柄整体尺寸过大以及由此引发的强度不足和干涉等问题,结合黑龙江地区土壤特性与胡萝卜种植模式,选取滑切角 $\theta=44.5^\circ$ 。

3 离散元模型建立与仿真分析

运用离散元仿真软件 EDEM 建立部件-土壤-作物多元仿真模型,以前进阻力和胡萝卜拔取力为主要评价指标,在常规工况下对胡萝卜联合收获机

田间作业状态进行模拟,分析影响机具作业性能的主要因素,为后续仿真优化及田间试验验证奠定基础。

3.1 离散元模型建立

3.1.1 松土铲及胡萝卜仿真模型

为合理有效地进行仿真模拟与计算,对整机模型简化处理,去除其牵引机具及各级传动箱体等部件^[17]。应用三维制图软件 SolidWorks 对机具进行实体建模(比例 1:1),以 .step 文件格式导入 EDEM 软件中,根据物理样机试制特点,松土铲材料属性为 65Mn 钢,泊松比为 0.35,剪切模量为 7.8×10^{10} Pa,密度为 $7\,850\text{ kg/m}^3$ 。

为精准模拟胡萝卜与土壤间的接触关系,取若干胡萝卜利用先临三维公司生产的 EinScan Pro 2x 型非接触式三维扫描仪对胡萝卜进行扫描,建立胡萝卜三维模型,如图9所示,并将其导入 EDEM 仿真土槽中。

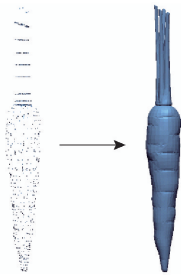


图9 胡萝卜点云与三维模型

Fig.9 Carrot point cloud and 3D model

3.1.2 土壤颗粒模型

建立准确的土壤颗粒模型是保证仿真结果有效性的基础。现有研究表明,土壤颗粒的基本结构主要包括粒状颗粒、团粒状颗粒、片状颗粒和杆状颗粒,如图10所示。在 EDEM 中设置4种颗粒^[18-20],并在土槽中添加颗粒工厂命令进行填充。为保证仿真与实际土壤的一致性,设置 EDEM 球形填充单元半径为 3 mm。

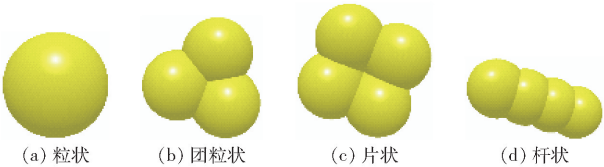


图10 土壤颗粒离散元模型

Fig.10 Discrete element simulation models of soil particles

为准确模拟机械部件-土壤-胡萝卜状态,土壤颗粒黏结力主要根据其内部黏聚特性设定,将其内部黏结、内聚、摩擦及破碎等关系简化为 Hertz - Mindlin with bonding 接触模型^[21]来模拟土壤颗粒间、颗粒与边界间的相互作用。

3.1.3 其他仿真参数设定

将所建立的松土铲、胡萝卜三维模型和土壤颗粒模型导入 EDEM 软件中,通过其前处理模块 (Creator) 依次对接触力学作用关系和颗粒工厂进行设置。其中接触力学模型的选择是分析部件-土壤-作物间黏结作用的重要基础,直接影响部件与颗粒间作用关系,根据斜面法测量得到具体参数如表 1 所示。

表 1 离散元模型基本参数

Tab.1 Basic parameters of discrete element model

参数	数值
土壤-土壤间恢复系数 e_1	0.2
土壤-土壤间动摩擦因数 e_2	0.4
土壤-土壤间静摩擦因数 e_3	0.3
土壤-65Mn 间恢复系数 f_1	0.3
土壤-65Mn 间动摩擦因数 f_2	0.5
土壤-65Mn 间静摩擦因数 f_3	0.05
土壤-胡萝卜间恢复系数 b_1	0.5
土壤-胡萝卜间动摩擦因数 b_2	0.43
土壤-胡萝卜间静摩擦因数 b_3	0.2

为模拟实际胡萝卜联合收获作业状态,运用 EDEM 软件建立虚拟土槽,设置土槽基本尺寸(长×宽×高)为 400 mm×400 mm×500 mm,将其设定为虚拟颗粒工厂,以 10 000 个/s 的速率生成初速度为 0 m/s 的土壤颗粒模型,总量为 100 000 个,生成颗粒总时间为 10 s,保证土槽内存有充足颗粒进行仿真。在生成颗粒过程中,使其仅在重力作用下自由沉降,且整体生成后在颗粒群上方加载校准土壤密度所需的垂直载荷,进行土壤模型压实,使仿真与实际土壤保持一致。

3.2 虚拟仿真过程与评价指标

3.2.1 虚拟仿真过程

在虚拟作业过程中,设置松土铲位于土槽一侧进行初始作业,如图 11 所示。根据黑龙江省胡萝卜种植模式与农艺要求,胡萝卜根部长度约为 150 mm。为保证胡萝卜顺利拔取,设定松土铲入土深度 250 mm,铲翼宽度 125 mm,设置松土铲前进速度 0.7 m/s,胡萝卜拔取速度 0.4 m/s。为保证仿真的真实性,要求铲尖运动到胡萝卜下方时胡萝卜开始向上运动。为保证仿真的连续性,设置其固定时间步长为 5.76×10^{-5} s (即 Rayleigh 时间步长的 10%^[22-25]),总时间为 1.6 s,网格单元尺寸为 5 mm,为颗粒平均半径的 3 倍,以便对后续数据精准处理。通过仿真可得到松土铲对土壤的扰动情况,从 EDEM 后处理工具中导出胡萝卜拔取过程中胡萝卜所受土壤颗粒阻力以及前进阻力的实时数据^[26]。



图 11 EDEM 虚拟仿真过程分析

Fig. 11 Analysis of virtual simulation process of EDEM

3.2.2 虚拟仿真评价指标

由于目前国内外尚无评价胡萝卜联合收获作业质量的统一标准,查阅相关资料并结合实际胡萝卜种植农艺要求,选取松土铲前进阻力及胡萝卜拔取力为虚拟仿真分析的评价指标。

(1) 松土铲前进阻力

前进阻力是衡量机具综合性能的主要技术参数,直接体现整机作业性能^[27]。松土铲前进阻力主要由前部土壤阻力与底部土壤摩擦阻力两部分组成,通过 EDEM 软件对不同时刻松土铲前进阻力进行测定^[28],并将数据导入 Excel 软件中进行整理,计算机具各阶段阻力变化趋势,如图 12 所示。本研究主要对虚拟仿真状态下松土铲作业前进阻力进行测定分析。

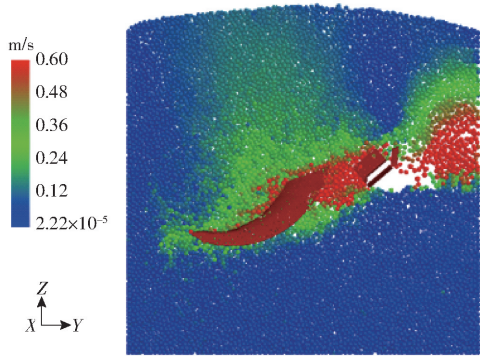


图 12 土壤颗粒速度变化分析

Fig. 12 Analysis of the change of soil particle velocity

(2) 胡萝卜拔取力

胡萝卜与土壤颗粒间也存在着粘结力,胡萝卜拔取过程中,胡萝卜与土壤间粘结力较大,造成胡萝卜缨果结合部断裂现象,从而导致胡萝卜漏拔率增加^[29-31]。因此,胡萝卜拔取力是检验松土铲性能的重要指标。当松土铲运动至胡萝卜下方时,土壤蓬松度达到峰值,胡萝卜所需拔取力最小,此时胡萝卜开始向上运动,运动过程中,由于胡萝卜与土壤间的粘结力较大,土壤颗粒粘附在胡萝卜表面,土壤颗粒间粘结键开始进一步断裂。由 EDEM 后处理命令对不同时刻胡萝卜拔取力进行数据输出,拔取时土壤颗粒速度变化如图 13 所示。

4 虚拟仿真试验与结果分析

4.1 虚拟仿真单因素试验

4.1.1 试验设计

为探究影响胡萝卜联合收获机松土铲作业质量

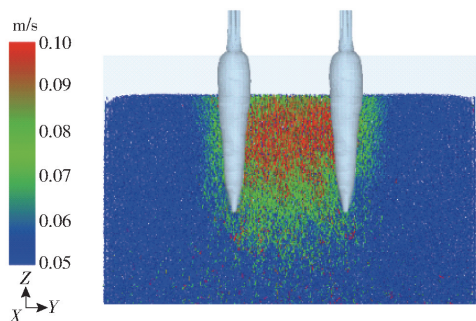


图13 土壤颗粒速度流线图

Fig. 13 Streamline diagram of soil particle velocity

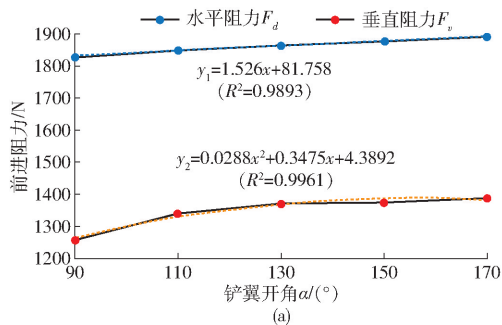
的主要因素取值范围,以铲翼开角 α 和铲翼倾角 β 为试验因素进行单因素试验,对松土铲前进阻力与胡萝卜拔取力进行测定分析。由上述力学分析可知,胡萝卜联合收获机松土铲作业质量与铲翼开角 α 、铲翼倾角 β 等因素密切相关。根据黑龙江地区胡萝卜种植农艺要求,选取不同铲翼开角 α ($90^\circ \sim 170^\circ$)和铲翼倾角 β ($5^\circ \sim 85^\circ$)研究对前进阻力与胡萝卜拔取力的影响,为后续正交试验提供理论基础。

4.1.2 单因素试验结果与分析

将各组数据记录到 Excel 软件中,即可得到不同结构参数下,前进阻力与胡萝卜拔取力变化规律。

(1) 前进阻力变化规律

由图14可知,松土铲与土壤颗粒相互作用初期,其前进阻力随时间增大而迅速增大。土壤颗粒

图15 铲翼开角 α 和铲翼倾角 β 对前进阻力的影响Fig. 15 Influence of opening angle α and inclination angle β on forward resistance

铲翼倾角 β 对松土铲阻力影响如图15b所示。随着 β 的增加,铲翼垂直截面积增大,对土壤的扰动性增强,大面积破坏土壤间粘结键,导致松土铲水平阻力 F_d 急剧增加,铲翼的水平截面积增加,土壤对铲翼的垂直分力增加。当铲翼倾角超过 45° 时,铲翼的水平截面积减小,土壤对铲翼的垂直分力减小,铲翼垂直阻力 F_v 在 45° 时达到峰值;当铲翼倾角超过 65° 时,垂直阻力趋于稳定,变化可忽略不计。

铲翼开角 α 和铲翼倾角 β 对胡萝卜拔取力的影响如图16所示,随着 α 增大,铲翼松土面积增加,胡萝卜拔取力减小。当 α 大于 150° 时,铲翼触碰胡萝卜

沿铲尖内侧曲线做变加速运动,土壤沿铲尖上端飞出。仿真作业0.5~0.8 s时,松土铲前进阻力迅速上升,主要由于土壤整体受到挤压变形至破碎需要消耗较大能量,松土铲进行挤压切削使土壤变形,因克服内部粘结与内聚作用,其变化速率较快。当仿真作业到1.23 s时,前进阻力急剧增加到峰值,主要由于铲翼进入土壤颗粒中,土壤扰动性增强,造成大量的土壤颗粒粘结键断裂。当仿真运行至1.3 s时,松土铲完全进入土槽中,前进阻力趋于稳定状态。

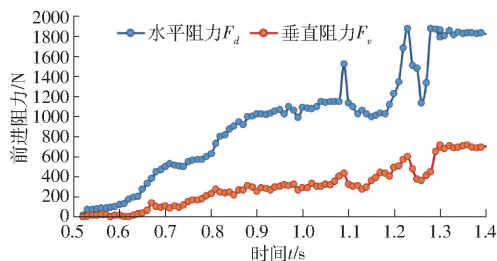
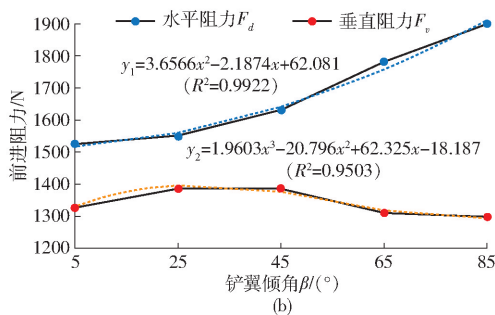


图14 各阶段虚拟作业阻力变化曲线

Fig. 4 Changing curves of resistance of virtual operation in simulation processes

铲翼开角 α 对前进阻力影响如图15a所示。随着 α 的增大,铲翼扰动范围增加,破坏土壤内部粘结键数量增多,水平阻力 F_d 也随着增加,土壤对铲翼的垂直分力增加,铲翼开角增加到 110° 时,垂直阻力接近峰值,后随着开角的增加,垂直阻力 F_v 涨幅不大。



表面,产生损伤。随着 β 增大,铲翼垂直截面积增加,土壤扰动性增加,胡萝卜拔取力减小,便于减小漏拔率;当 β 大于 25° 时,胡萝卜拔取力小于胡萝卜缨果结合部拉断力峰值,可满足胡萝卜联合收获要求。

综上所述,为得到试验因素最佳工作参数组合,选取铲翼开角 α ($110^\circ \sim 150^\circ$)和铲翼倾角 β ($25^\circ \sim 65^\circ$)为试验因素取值范围,为后续多因素试验提供理论基础。

4.2 虚拟仿真多因素试验

4.2.1 多因素试验设计

为研究松土铲性能变化规律,分析影响作业稳

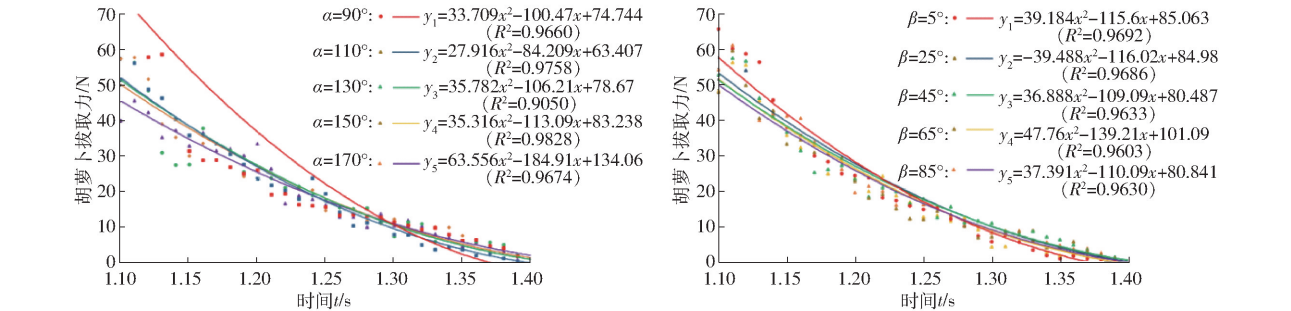


图 16 铲翼开角 α 和铲翼倾角 β 对胡萝卜拔取力的影响

Fig. 16 Influence of opening angle α and inclination angle β on extracting power of carrot

定性的主要因素,得到理想参数组合,在前期虚拟模型建立及数值模拟分析基础上,进行 EDEM 正交旋转虚拟仿真试验研究。结合前期理论分析和单因素预试验及常规胡萝卜收获作业状态,设定试验因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码

Tab.2 Coding of experimental factors

编码	因素	
	铲翼开角 $\alpha/(^{\circ})$	铲翼倾角 $\beta/(^{\circ})$
-1.414	110	25
-1	116	31
0	130	45
1	144	59
1.414	150	65

4.2.2 多因素试验结果与分析

采用二因素五水平二次正交旋转组合设计多因素优化虚拟试验方案,根据所得数据进行结果分析,并对影响指标的主要因素进行显著性分析。连续记录虚拟土槽上稳定工作状态下松土铲前进阻力与胡萝卜拔取力,其他各项参数保持恒定,数据取平均值作为试验结果。具体试验方案与结果如表 3 所示,其中 x_1 和 x_2 为因素编码值。

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据进行回归分析和因素方差分析,筛选出影响显著因素,得到前进阻力 F_3 和胡萝卜拔取力 F_4 与因素编码值间

表 3 试验方案与结果

Tab.3 Schemes and results of experiments

序号	试验因素		性能指标	
	铲翼开角 x_1	铲翼倾角 x_2	前进阻力/N	胡萝卜拔取力/N
1	-1	-1	2 236.73	91.34
2	1	-1	2 366.28	55.34
3	-1	1	2 209.77	47.68
4	1	1	2 821.75	45.36
5	-1.414	0	1 912.57	65.33
6	1.414	0	2 550.63	48.68
7	0	-1.414	1 972.35	51.37
8	0	1.414	2 456.97	48.28
9	0	0	2 097.66	55.16
10	0	0	2 095.72	52.12
11	0	0	2 105.36	54.76
12	0	0	2 103.81	54.68
13	0	0	2 087.69	53.12
14	0	0	2 111.74	53.76
15	0	0	2 113.55	54.81
16	0	0	2 109.39	52.73

回归方程

$$F_3 = 2\,103.12 + 205.49x_1 + 139.23x_2 + 120.61x_1x_2 + 110.62x_1^2 + 102.15x_2^2 \quad (13)$$

$$F_4 = 53.89 - 7.73x_1 - 7.25x_2 + 8.42x_1x_2 + 3.19x_1^2 - 0.40x_2^2 \quad (14)$$

为直观地分析指标与因素间关系,运用 Design-Expert 8.0.6 软件得到响应曲面,如图 17 所示。

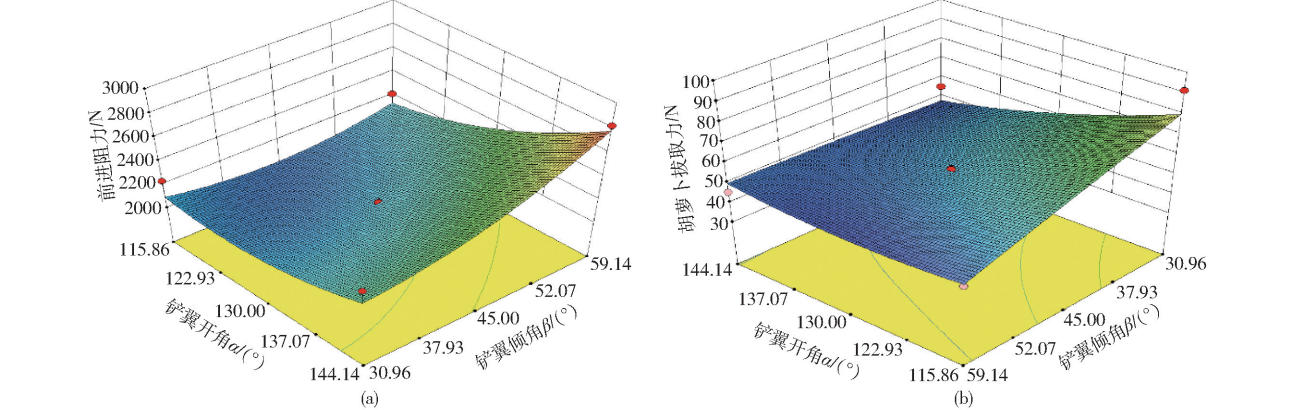


图 17 试验因素对指标的影响曲面

Fig. 17 Influence surfaces of experiment factors on indexes

在作业指标满足胡萝卜收获农艺要求下,对各因素影响规律进行分析,根据相关回归方程和响应曲面中的等高线分布密度可知,铲翼开角 α 和铲翼倾角 β 对松土铲前进阻力和胡萝卜拔取力存在交互作用。由图 17a 可知,当铲翼开角 α 一定时,随着铲翼倾角 β 的增加,前进阻力增加;当铲翼倾角 β 一定时,随着铲翼开角 α 的增加,前进阻力增加;当铲翼倾角 β 变化时,前进阻力变化区间较大,因此铲翼倾角 β 是影响前进阻力的主要因素。由图 17b 可知,当铲翼开角 α 一定时,随着铲翼倾角 β 的增加,铲翼推土截面积增加,扰动增强,胡萝卜拔取力降低;当铲翼倾角 β 一定时,随着铲翼开角 α 的增加,铲翼水平面积增加,胡萝卜拔取力降低;当铲翼倾角 β 变化时,胡萝卜拔取力变化区间较大,因此铲翼倾角 β 是影响胡萝卜拔取力的主要因素。

为得到试验因素最佳工作组合,对试验进行优化设计。建立参数化数学模型,结合试验因素的边界条件,遵循减阻增扰(减小前进阻力与胡萝卜拔取力)原则,对机具前进阻力和胡萝卜拔取力回归方程进行分析,建立非线性规划参数模型

$\min F_3$

$\min F_4$

s. t.

$110^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$

$25^\circ \leq \beta \leq 65^\circ$

$0 \leq F_3 \leq 3\,000\text{ N}$

$0 \leq F_4 \leq 70\text{ N}$

(15)

运用 Design-Expert 8.0.6 软件中的多目标参数优化(Optimization)模块对数学模型进行分析求解,可得多组优化参数组合。从优化结果中选取一组合理参数组合,即当铲翼开角 α 为 120.27° ,铲翼倾角 β 为 47.37° 时,机具综合作业性能较理想,其前进阻力为 $2\,026.35\text{ N}$,胡萝卜拔取力为 58.53 N 。根据所优化的结果进行虚拟仿真验证,其前进阻力为 $1\,908.76\text{ N}$,胡萝卜拔取力为 55.37 N ,与优化结果基本一致。

5 田间性能试验

5.1 试验方法

为检验设计的高效减阻松土铲作业性能,结合理论分析与仿真模拟结果进行高效减阻松土铲的试验。于 2018 年 10 月 6 日在黑龙江省哈尔滨市庆丰村进行田间性能试验和对比试验。试验区土壤质地为黑壤土,运用环刀测试法对不同深度土壤容重进行测量^[32],由测量结果可知: $0 \sim 100\text{ mm}$ 范围内土壤容重为 1.236 g/cm^3 , $100 \sim 200\text{ mm}$ 范围内土壤容

重为 1.433 g/cm^3 , $200 \sim 300\text{ mm}$ 范围内土壤容重为 1.308 g/cm^3 。高效减阻松土铲与凿式松土铲分别安装在 4UZL-2 型自走式胡萝卜联合收获机上,田间试验现场如图 18 所示。



图 18 田间性能试验
Fig. 18 Field performance experiment

试验主要仪器设备:环刀组件、牵引力负荷传感器、无线动态应变采集仪组件、土壤紧实度测定仪、拉力计、水平尺、卷尺、直尺等。

试验中选取地势平坦,长度为 300 m 的试验地块,设定前、后 10 m 为调试区,中间 30 m 为工作平稳区。机具作业速度设定为 0.7 m/s ,以松土后胡萝卜拔取力与机具前进阻力作为评价指标,将电阻式应变片粘贴在松土铲前后两侧。采用屏蔽线按照半桥连接方式将电阻应变片接入到东华 DH5908 无线动态应变采集仪中采集机具前进阻力,利用拉力计对不同区域松土后胡萝卜进行拔取力试验并观察机具后方漏拔情况,计算漏拔率,试验重复 5 次,机具田间试验情况如图 19 所示。



图 19 田间试验现场

Fig. 19 Field experiment site

5.2 田间试验结果与分析

田间试验的目的是验证虚拟仿真试验得出的高效减阻松土铲最佳结构组合是否具有良好的作业效果,试验结果如表 4 所示。

试验结果表明,高效减阻松土铲作业时,前进阻力最大为 $2\,034.23\text{ N}$,最小为 $1\,886.16\text{ N}$,平均

表 4 田间性能对比试验结果

Tab.4 Field performance comparison experiment results

序号	高效减阻松土铲			凿式松土铲		
	前进阻 力/N	胡萝卜拔 取力/N	漏拔 率/%	前进 阻力/N	胡萝卜拔 取力/N	漏拔 率/%
1	1 907.32	54.6	2.7	2 006.65	71.9	7.6
2	1 966.51	56.3	3.6	1 996.44	81.3	6.3
3	2 034.23	61.7	2.9	2 101.97	88.3	6.5
4	1 886.16	66.5	2.8	2 087.13	73.2	6.8
5	1 932.27	54.3	3.5	2 132.47	55.3	7.1
均值	1 945.30	58.7	3.1	2 064.93	74.0	6.9

1 945.30 N;胡萝卜拔取力最大为 66.5 N,最小为 54.3 N,平均 58.7 N;漏拔率最大为 3.6%,最小为 2.7%,平均 3.1%。与凿式松土铲相比,仿生铲尖在破开垄面土壤的同时,土壤沿铲尖内侧曲线做变加速运动,土壤沿铲尖上端飞出,减小土壤能量损失以达到减阻目的;铲翼在土壤中滑动,破坏土壤与胡萝卜间的粘附作用,增大土壤扰动面积及蓬松度;铲柄随后破开胡萝卜行间表面土壤,进一步减小胡萝卜与土壤粘附面积,降低胡萝卜拔取力与漏拔率。

由表 4 可知,在相同工况下实际松土铲作业质量略低于仿真试验优化结果,其前进阻力相对误差为 4.0%,胡萝卜拔取力相对误差为 6.0%。产生误差的原因可能是由于土壤外界条件状态变化造成机具非规则振动,影响机具作业稳定性,但误差在可接受范围内。与凿式松土铲相比,高效减

阻松土铲前进阻力降低 5.79%,胡萝卜拔取力降低 20.68%,漏拔率降低 3.8 个百分点,满足胡萝卜收获农艺要求。

6 结论

(1) 设计了一种高效减阻松土铲,提高了土壤扰动性,降低了前进阻力、胡萝卜拔取力和漏拔率,满足胡萝卜收获农艺要求。

(2) 以狗獾爪趾为仿生原型设计了仿生减阻铲尖,分析了其减阻机理。建立了铲翼与土壤间的力学接触模型,探究铲翼与土壤间力学规律,确定了影响松土铲作业质量的铲翼结构参数为铲翼开角和铲翼倾角。

(3) 利用离散元法建立了部件-土壤-作物多元仿真模型,以铲翼开角和铲翼倾角为试验因素,以前进阻力和胡萝卜拔取力为试验指标,采用虚拟正交试验方法建立了因素与指标间数学模型,运用多目标变量优化方法建立了优化模型,得出松土铲铲翼最优参数组合为铲翼开角 120.27°、铲翼倾角 47.37°。

(4) 田间性能试验表明,田间试验结果与仿真优化结果基本一致,高效减阻松土铲前进阻力均值为 1 945.30 N,胡萝卜拔取力均值 58.7 N,整机漏拔率为 3.1%,高效减阻松土铲综合作业性能优于凿式松土铲,可满足胡萝卜收获农艺要求。

参 考 文 献

[1] 王俊,杜冬冬,胡金冰,等. 蔬菜机械化收获技术及其发展[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 81-87. WANG Jun, DU Dongdong, HU Jinbing, et al. Vegetable mechanized harvesting technology and its development[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 81-87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140214&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.014. (in Chinese)

[2] 赵淑红,王加一,陈君执,等. 保护性耕作拟合曲线型深松铲设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 82-92. ZHAO Shuhong, WANG Jiayi, CHEN Junzhi, et al. Design and experiment of fitting curve subsoiler of conservation tillage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 82-92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180211&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.011. (in Chinese)

[3] 杭程光,黄玉祥,李伟,等. 深松耕作阻力的影响因素分析与减阻策略[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(11): 202-208. HANG Chengguang, HUANG Yuxiang, LI Wei, et al. Influencing factors and reduction strategies of subsoiling tillage resistance[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2016, 44(11): 202-208. (in Chinese)

[4] 郑侃,何进,李洪文,等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 62-72. ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 62-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160910&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010. (in Chinese)

[5] 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/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 1-13. JIA Honglei, WANG Wanpeng, CHEN Zhi, et al. Research status and prospect of soil-engaging components optimization for agricultural machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 1-13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170701&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.001. (in Chinese)

- www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170701&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.001. (in Chinese)
- [6] 张金波, 佟金, 马云海. 仿生减阻深松铲设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 141 – 145.
ZHANG Jinbo, TONG Jin, MA Yunhai. Design and experiment of bionic anti-drag subsoiler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 141 – 145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20140422&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.022. (in Chinese)
- [7] 白景峰, 李博, 吕秀婷, 等. 基于狗獾爪趾的仿生深松铲振动减阻研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(5): 224 – 227.
BAI Jingfeng, LI Bo, LÜ Xiuting, et al. Study on vibration anti-drag of the badger claws bionic subsoiler[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(5): 224 – 227. (in Chinese)
- [8] 谷志新, 郑文超. 狗獾前肢挖掘洞穴运动图像采集[J]. 经济动物学报, 2013, 17(3): 152 – 154.
GU Zhixin, ZHENG Wenchao. Hole digging kinematic image acquisition of badger forelimb digging hole[J]. Journal of Economic Animal, 2013, 17(3): 152 – 154. (in Chinese)
- [9] 陈东辉. 典型生物摩擦学结构及仿生[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
CHEN Donghui. Typical bio-tribological structures and their biomimetic applications[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- [10] 胡双喜. 基于逆向工程的个性化产品创新设计与模型制作[J]. 机械工程与自动化, 2019(5): 197 – 199.
HU Shuangxi. Personalized product innovation design and model making based on reverse engineering[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019(5): 197 – 199. (in Chinese)
- [11] 陈龙健, 李诚, 张安琪, 等. 基于逆向工程的D型打结器重构与运动仿真[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 104 – 108, 125.
CHEN Longjian, LI Cheng, ZHANG Anqi, et al. Reconstitution and motion simulation of D-bale knotter based on reverse engineering[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 104 – 108, 125. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20141217&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.017. (in Chinese)
- [12] 俞杰, 王荣吉, 童希, 等. 兔子爪趾曲面重构及特征曲线的提取[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(8): 43 – 47.
YU Jie, WANG Rongji, TONG Xi, et al. Reconstruction of rabbit's claw toe surface and extraction of feature curve[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(8): 43 – 47. (in Chinese)
- [13] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 124 – 136. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20181014&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.014. (in Chinese)
- [14] KORNEL T, ISTVAN J J, MOUAZEN A M. Modelling soil-sweep interaction with discrete element method[J]. Soil & Tillage Research, 2013, 134: 223 – 231.
- [15] 侯守印, 陈海涛, 邹震, 等. 原茬地种床整备侧向滑切清秸刀齿设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 41 – 51, 217.
HOU Shouyin, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Design and test of side-direction straw-cleaning blade for seedbed treatment of original stubble planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 41 – 51, 217. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190605&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.005. (in Chinese)
- [16] 郑智旗, 何进, 李洪文, 等. 动定刀支撑滑切式秸秆粉碎装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 108 – 116.
ZHENG Zhiqi, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of straw-chopping device with chopping and fixed knife supported slide cutting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 108 – 116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2016s017&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.017. (in Chinese)
- [17] 王金武, 唐汉, 王金峰, 等. 悬挂式水田单侧修筑埂机数值模拟分析与性能优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 72 – 80.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Numerical analysis and performance optimization experiment on hanging unilateral ridger for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 72 – 80. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170807&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.007. (in Chinese)
- [18] 黄玉祥, 杭程光, 苑梦婵, 等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 80 – 88.
HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance

- behavior of subsoiling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 80–88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160712&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.012. (in Chinese)
- [19] SUN Jiyu, WANG Yueming. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth >40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics[J]. Advances in Engineering Software, 2018, 119: 30–37.
- [20] SPOOR G, GODWIN R J. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1978, 23(3): 243–258.
- [21] SHU L H, UEDA K, CHIU I, et al. Biologically inspired design[J]. CIRP Annals, 2011, 60(2): 673–693.
- [22] TONG Jin, LÜ Tiebiao, MA Yunhai, et al. Two-body abrasive wear features of surfaces of pangolin scales[J]. Journal of Bionic Engineering, 2007, 4(2): 77–84.
- [23] DAS B M. Advanced soil mechanics[M]. London: Taylor & Francis, 2008.
- [24] UGGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. 3D DEM tillage simulation: validation of a hysteretic spring (plastic) contact model for a sweep tool operating in a cohesionless soil[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 144(4): 220–227.
- [25] BECHERT D W. Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry[J]. J. Fluid. Mech., 1997, 338(1): 59–87.
- [26] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 78–85. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171209&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.009. (in Chinese)
- [27] 王燕. 基于离散元法的深松铲结构与松土效果研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014. WANG Yan. Simulation analysis of structure and effect of the subsoiler based on DEM[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [28] 廖庆喜, 张朋玲, 廖宜涛, 等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 109–114. LIAO Qingxi, ZHANG Pengling, LIAO Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 109–114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140219&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.019. (in Chinese)
- [29] 李承鹏. 基于 EDEM 的胡萝卜拔取力的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018. LI Chengpeng. Study on the extraction force of carrot based on EDEM[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [30] 李凯锋, 杨炳南, 杨薇, 等. 国内外胡萝卜种植现状及播种机研究进展[J]. 农业工程, 2015, 5(1): 1–5. LI Kaifeng, YANG Bingnan, YANG Wei, et al. Planting status and research progress on seeding machine of carrot at home and abroad[J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(1): 1–5. (in Chinese)
- [31] 尹凯. 收获期胡萝卜与土壤间物理力学特性的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017. YIN Kai. Study on physical and mechanical properties of carrot and soil during harvest[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [32] 张瑞国, 罗强, 张良, 等. 一种砂类土的环刀取样技术及试验验证[J]. 工程勘察, 2017, 45(8): 1–6, 22. ZHANG Ruiguo, LUO Qiang, ZHANG Liang, et al. A sampling technique with cutting ring for sandy soil and its experimental verification[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2017, 45(8): 1–6, 22. (in Chinese)