

基于东方蝼蛄爪趾的仿生旋耕刀设计与试验

肖茂华¹ 汪开鑫¹ 杨望² 王伟臣¹ 江丰¹

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 广西大学机械工程学院, 南宁 530004)

摘要: 为了降低旋耕刀耕作时的能耗, 本文基于东方蝼蛄前足爪趾轮廓拟合曲线的特征, 利用逆向工程技术将东方蝼蛄前足爪趾 1、2、3、4 的轮廓曲线依次排列于 IT245 国标旋耕刀的正切刃与回转半径末端边缘, 设计了仿生旋耕刀。建立南方粘湿土壤-旋耕刀相互作用仿真模型, 分析不同刀轴转速下国标旋耕刀、仿生旋耕刀扭矩和三向阻力的变化规律, 结合室内土槽试验分析刀轴扭矩的变化趋势, 验证离散元仿真模型的有效性。单刀受力仿真分析表明, 仿生旋耕刀与国标旋耕刀的水平阻力、垂直阻力与侧向阻力均随着刀轴转速的增加而逐渐增大。在 3 种刀轴转速下, 除侧向阻力以外, 仿生旋耕刀受到的水平阻力与垂直阻力的最大值均比国标旋耕刀小。在刀轴转速 150 r/min 时, 仿生旋耕刀较国标旋耕刀水平阻力与垂直阻力的最大值分别降低了 9.91% 与 9.09%; 在转速 200 r/min 时, 分别降低了 5.78% 与 9.74%; 在转速 250 r/min 时, 分别降低了 4.95% 与 6.38%。土槽扭矩试验表明, 仿生旋耕刀与国标旋耕刀的仿真值与试验值变化趋势相同, 且随着刀轴转速的增加扭矩逐渐增大, 最大相对误差为 13.23%。在 3 种刀轴转速下, 仿生旋耕刀较国标旋耕刀平均扭矩分别降低了 10.53%、4.46%、3.49%。本研究可为旋耕刀减阻降耗和耕作能耗分析提供借鉴。

关键词: 东方蝼蛄; 仿生; 前足爪趾轮廓; 旋耕刀; 三向阻力; 离散元

中图分类号: S222.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)02-0055-09

OSID:



Design and Experiment of Bionic Rotary Blade Based on Claw Toe of *Gryllotalpa orientalis* Burmeister

XIAO Maohua¹ WANG Kaixin¹ YANG Wang² WANG Weichen¹ JIANG Feng¹

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Field rotary tillage is an important part of the agricultural production process. In order to reduce the energy consumption during rotary blade farming, based on the characteristics of the contour fitting curves of the forefoot toes of *Gryllotalpa orientalis* Burmeister, using reverse engineering technology, the contour curves of the first, second, third and fourth claw toes of the forefoot were arranged in sequence on the cutting edge and the end edge of the gyration radius of the IT245 national standard rotary blade to design a bionic rotary blade. A soil-rotary blade interaction model of the southern clay-wet soil-blade was established to analyze the changes in torque and three-axis working resistance of the national standard and bionic rotary blade at different rotate speeds. Combined with the indoor soil bin test, the trend of the torque on the tool shaft was analyzed to verify the validity of the discrete element simulation model. The force simulation analysis of a single blade showed that the horizontal resistance, vertical resistance and lateral resistance of the national standard and bionic rotary blade were all gradually increased with the increase of speed. At three different rotate speeds, except for the lateral resistance, the maximum horizontal and vertical resistance of the bionic rotary blade were lower than that of the national standard rotary blade. Compared with the national standard rotary blade, when the rotate speed was at 150 r/min, 200 r/min and 250 r/min, the maximum horizontal resistance of the bionic rotary blade was reduced by 9.91%, 5.78% and 4.95%, respectively, and the vertical resistance of which was reduced by 9.09%, 9.74% and 6.38%, respectively. The soil bin torque test showed that the simulation and experimental values of the two rotary blades had the same changing trend. The torque was

收稿日期: 2020-11-27 修回日期: 2020-12-20

基金项目: 江苏省重点研发计划项目(BE2018127)和中央高校基本科研业务费项目(KYGD202005)

作者简介: 肖茂华(1981—),男,教授,主要从事高端农机装备维护研究, E-mail: xiaomaohua@njau.edu.cn

gradually increased as the increase of rotate speed, and the maximum relative error was up to 13.23%. Compared with the national standard rotary blade, when the rotate speed was at 150 r/min, 200 r/min and 250 r/min, the average torque of the bionic rotary blade was reduced by 10.53%, 4.46% and 3.49%, respectively. The research results can provide a certain reference for the analysis of drag reduction and energy consumption of the rotary blade.

Key words: *Gryllotalpa orientalis* Burmeister; bionic; forefoot contour; rotary blade; three-axis working resistance; discrete element

0 引言

旋耕刀是一种基于铣切原理加工的土壤耕作机械^[1-2]。其中,旋耕弯刀是旋耕机的主要部件^[3-5],其性能直接影响整个旋耕机的作业质量和能耗水平。为了提高旋耕机工作效率,旋耕刀几何结构优化设计一直是国内外研究的重点。郝建军等^[6]设计了一种楔形减阻旋耕刀,田间试验表明,在相同工况下,楔形减阻旋耕刀的平均扭矩较国标旋耕刀降低11.35%,平均功耗较国标旋耕刀降低9.29%,碎土率提高4%。GODWIN^[7]在研究土壤耕具作业时,获得不同宽窄齿的耕具在土壤切削过程中所受的水平阻力变化规律。

近些年,随着仿生学在农业领域的应用,土壤耕具作业时阻力大、能耗高的问题得到了一定的缓解。杨玉婉等^[8]研究了前肢手掌的多趾组合结构特征,设计了具有鼯鼠多趾结构特征的仿生旋耕刀,通过田间试验对比表明,在不同前进速度和弯刀转速情况下,旋耕机整机功耗平均降低了约20%左右。俞杰^[9]以安哥拉兔爪趾为原型设计了仿生旋耕刀,通过试验得出,与传统旋耕刀相比其工作时降阻率达到了17.8%,最大扭矩也降低了44.9 N·m。东方蝼蛄俗称“土仙”,挖土能力极强,前足特化为钉耙状,能够在一夜之间挖掘出2 000~3 000 mm长的洞穴^[10]。目前,已有研究学者将东方蝼蛄前爪趾应用于深松铲、触土试件以及挖掘机仿生斗齿的设计中^[11-13]。本文基于东方蝼蛄前足爪趾轮廓曲线,设计具有仿生结构特征的旋耕刀,借助仿真软件进行离散元仿真分析,然后进行室内土槽试验验证,分析国标旋耕刀与仿生旋耕刀扭矩、三向阻力的变化规律,以为旋耕刀的减阻降耗提供借鉴。

1 仿生旋耕刀设计

1.1 前足爪趾轮廓曲线拟合

东方蝼蛄(图1a)的前足为钉耙状,具有较强的挖土性能。东方蝼蛄前足爪趾轮廓相对较为复杂,因此需要将爪趾轮廓分为上、下曲线(图1b)。通过研究上、下爪趾轮廓曲线获得东方蝼蛄前足爪趾曲线的趋势^[14]。

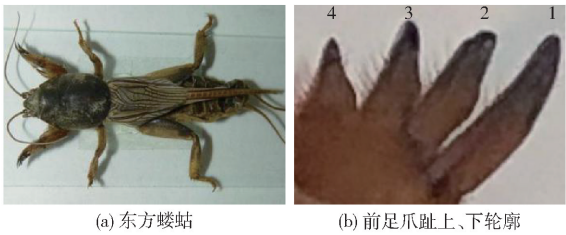


图1 东方蝼蛄及前足爪趾

Fig. 1 *Gryllotalpa orientalis* Burmeister and its forefoot toes

通过逆向工程技术及软件对东方蝼蛄前足爪趾的结构进行采样和数据处理^[15],将得到的爪趾轮廓曲线的点云数据代入到AutoCAD 2016中,获取爪趾轮廓曲线的X与Y坐标值数据,最后,使用曲线拟合(Curve fitting)工具箱将二维坐标数据导入到Matlab 2018。基于最小二乘法拟合东方蝼蛄4个爪趾轮廓曲线(图2),4个爪趾轮廓拟合方程均为高斯方程,方程系数如表1、2所示。

爪趾1上轮廓高斯方程为

f(x) = a_1 e^{-(\frac{x-b_1}{c_1})^2} + a_2 e^{-(\frac{x-b_2}{c_2})^2} \tag{1}

爪趾1下轮廓高斯方程为

f(x) = a_1 e^{-(\frac{x-b_1}{c_1})^2} + a_2 e^{-(\frac{x-b_2}{c_2})^2} + a_3 e^{-(\frac{x-b_3}{c_3})^2} \tag{2}

爪趾2、3、4的上、下轮廓高斯方程为

f(x) = a_1 e^{-(\frac{x-b_1}{c_1})^2} + a_2 e^{-(\frac{x-b_2}{c_2})^2} \tag{3}

1.2 设计原理与过程

目前,横轴式旋耕机上采用的旋耕刀主要有弯形刀、直角刀以及凿形刀3种类型^[16]。本文从弯形刀入手,旋耕弯刀是由刀柄、包含侧切刃的侧切面、过渡刃的过渡面以及正切刃的正切面4部分组成^[17]。通常情况下,旋耕刀主要的工作部位是正切刃与侧切刃,而正切刃需承担碎土、翻土以及切土的作用,因此为旋耕刀上最主要的耗能工作部件^[18]。

东方蝼蛄前足平行置于身体两侧并指向前方,但其爪趾向外翘起,这与旋耕刀的结构有一定的相似之处。东方蝼蛄前足挖土运动轨迹近似为具有一定弧度的轨迹曲线^[19]。而旋耕刀运动轨迹是由圆周运动和直线运动所组成的摆线运动^[20],两者运动轨迹存在一定的差异。通过测量20只东方蝼蛄前

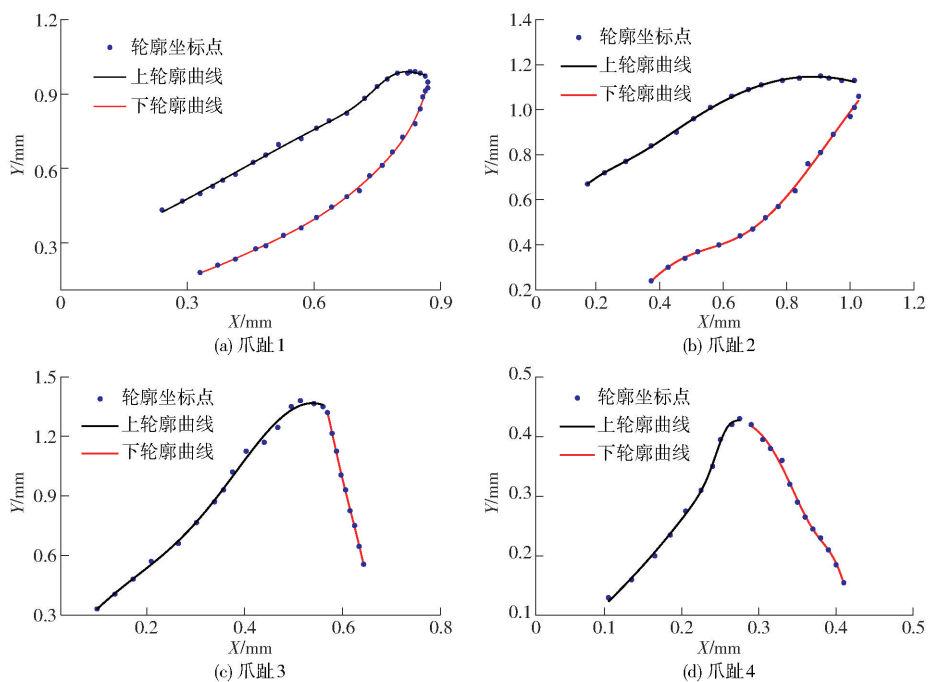


图 2 东方螞蛄前足爪趾上、下轮廓拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves of upper and lower contours of forefoot and toe of *Gryllotalpa orientalis* Burmeister

表 1 东方螞蛄前足爪趾 1 拟合曲线方程系数		
Tab. 1 Fitting curve equation coefficients of the first claw toe of <i>Gryllotalpa orientalis</i> Burmeister		
系数	爪趾 1 上轮廓	爪趾 1 下轮廓
a_1	13. 12	14. 7
b_1	132. 9	144. 6
c_1	12. 68	2. 7
a_2	164. 6	-3. 506
b_2	177	118. 6
c_2	148. 9	9. 569
a_3		$1. 044 \times 10^{10}$
b_3		2 327
c_3		512. 6
SSE	1. 95	2. 43
R^2	0. 999 1	0. 999 4

足与其 4 个爪趾长度、爪趾之间角度等信息,根据仿生设计中的比例法^[21-22],结合两者运动轨迹与结构的异同性进行设计。由于东方螞蛄前足挖土过程中存在着伸展与向外扩张两种运动,且扩张运动受力与旋耕刀侧向阻力相似,因此在采用东方螞蛄爪趾轮廓曲线信息的同时,考虑了仿生齿形强度问题,将 4 个爪趾齿形的齿根长度 L 稍微加大, $L_1 \sim L_4$ 分别为 5. 0、4. 0、3. 5、6. 0 mm;减小两齿间夹角 α , $\alpha_1 \sim \alpha_4$ 分别为 21° 、 22° 、 33° 、 42° ,具体如图 3 所示。总体结构是依据国标旋耕刀的结构特征,将东方螞蛄前足的爪趾 1、2、3、4 的轮廓曲线依次排列于正切刃与回转半径的末端边缘(图 4a)。

在国标刀座式旋耕刀毛坯的基础上,仿生设计

表 2 东方螞蛄前足爪趾 2、3、4 拟合曲线方程系数						
Tab. 2 Fitting curve equation coefficients of the second, third and fourth claws of <i>Gryllotalpa orientalis</i> Burmeister						
系数	爪趾 2 上轮廓	爪趾 2 下轮廓	爪趾 3 上轮廓	爪趾 3 下轮廓	爪趾 4 上轮廓	爪趾 4 下轮廓
a_1	134. 7	26. 93	143. 3	38. 42	9. 281	144. 5
b_1	136. 3	102. 4	114. 6	111. 7	131. 8	135. 2
c_1	73. 16	17. 93	31. 41	4. 858	4. 299	32. 73
a_2	7. 895	160. 9	71. 57	124	$7. 985 \times 10^{16}$	16. 89
b_2	82	173	66. 36	115. 5	4732	161. 4
c_2	11. 73	50. 96	31. 53	15. 03	788. 7	6. 743
SSE	0. 290	0. 604	0. 748	0. 302	0. 601	0. 870
R^2	0. 999 3	0. 998 1	0. 997 2	0. 999 2	0. 998 3	0. 997 4

采用国标旋耕刀的回转半径 R 为 245 mm,材质为 65 Mn 钢。根据国家标准 GB/T 5669—2008《旋耕机械 刀和刀座》^[23],刀身热处理硬度为 48~54 HRC;

刀柄热处理硬度为 38~45 HRC,旋耕刀刀身部分金相组织为回火马氏;刀柄部分为回火屈氏体,最后旋耕刀的表面无裂纹,实物如图 4b 所示。

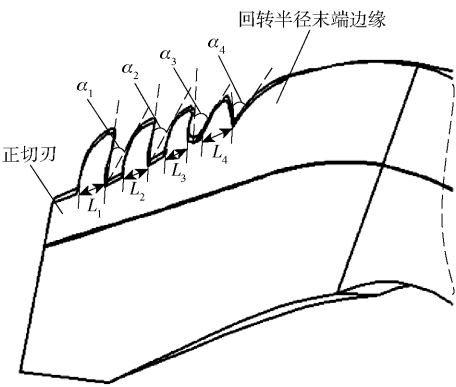


图3 仿生齿形相关信息

Fig.3 Bionic tooth profile related information

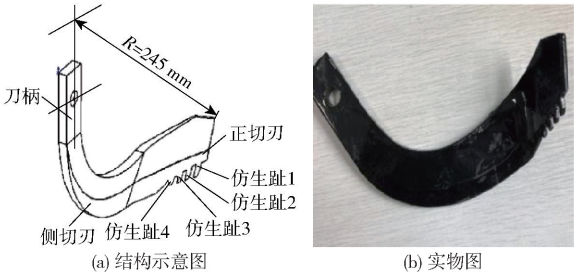


图4 仿生旋耕刀结构示意图与实物图

Fig.4 Schematics and physical map of bionic rotary blade

2 离散元仿真分析

采用 EDEM 2018 软件对国标与仿生旋耕刀这 2 种刀片的耕作过程进行仿真试验,对比 2 种旋耕刀所受的扭矩和三向阻力情况。

2.1 土壤颗粒接触模型

采用 Hertz - Mindlin with Bonding 模型,此接触模型在粘结土壤破碎的过程中具有很好的应用效果,能在土壤颗粒中产生一定的约束,这种土壤间的约束能对土壤产生切向和法向的运动阻力,直到颗粒彼此间的力达到破坏约束作用时,土壤颗粒间才会产生作用^[24-26]。外界对土壤的法向粘结力 F_n 、法向力矩 M_n 、切向粘结力 F_τ 和切向力矩 M_τ 计算式为

$$\delta F_n = -v_n S_n A \delta t \tag{4}$$

$$\delta F_\tau = -v_\tau S_\tau A \delta t \tag{5}$$

$$\delta M_n = -\omega_n S_n J \delta t \tag{6}$$

$$\delta M_\tau = -\omega_\tau S_\tau \frac{J}{2} \delta t \tag{7}$$

其中 $A = \pi R_b^2$ $J = \frac{1}{2} \pi R_b^4$

式中 A ——接触区域面积, m^2
 R_b ——粘结半径, mm
 J ——截面积惯性矩, m^4
 S_n 、 S_τ ——颗粒法向、切向粘结刚度, N/m^3
 v_n 、 v_τ ——颗粒法向、切向速度, m/s

ω_n 、 ω_τ ——颗粒法向、切向角速度, rad/s

δt ——时间步长, s

当某一时刻外界作用力超过使土壤粘结的最大切向与法向作用力时,粘结会被破坏,土壤颗粒之间相互作用力将不会受到粘结作用的约束。定义条件为

$$\delta_{max} < \frac{-F_n}{A} + \frac{2M_\tau}{J} R_b \tag{8}$$

$$\tau_{max} < \frac{-F_\tau}{A} + \frac{M_n}{J} R_b \tag{9}$$

式中 δ_{max} ——法向临界应力, Pa

τ_{max} ——切向临界应力, Pa

2.2 土壤模型参数

EDEM 离散元仿真基本原理是用球模拟土壤颗粒模型。目前,大多数研究者采用直径小于 10 mm 的球体作为土壤模型^[27-32]。为了兼顾计算机分析时间与仿真效果,仿真采用直径 8 mm 的球体来作为土壤颗粒。采用的 Hertz - Mindlin with Bonding 模型中存在 5 个主要粘结参数,分别为:颗粒法向粘结刚度 S_n 、切向粘结刚度 S_τ ;粘结颗粒法向临界应力 δ_{max} 、切向临界应力 τ_{max} 以及颗粒粘结半径 R_b 。在土壤颗粒半径确定的情况下,通过材料密度与土壤含水率可计算得粘结半径 R_b ^[33]。参考该模型应用于土壤耕作方面的研究成果^[24-26, 31-32],其余 4 个粘结参数、各个材料之间的静摩擦因数、动摩擦因数以及恢复系数如表 3 所示。

表3 材料性能参数与接触参数

Tab.3 Material performance parameters and contact parameters

参数	数值
65Mn 钢密度/($kg \cdot m^{-3}$)	7 860
65Mn 钢剪切模量/ Pa	7.9×10^{10}
65Mn 钢泊松比	0.3
土壤密度/($kg \cdot m^{-3}$)	1 850
土壤泊松比	0.38
土壤剪切模量/ Pa	1×10^6
土壤-土壤静摩擦因数	0.6
土壤-土壤滚动摩擦因数	0.4
土壤-土壤恢复系数	0.6
土壤-65Mn 静摩擦因数	0.6
土壤-65Mn 滚动摩擦因数	0.05
土壤-65Mn 恢复系数	0.6
土壤粘结半径/ mm	9.0
土壤法向粘结刚度/($N \cdot m^{-3}$)	5×10^7
土壤切向粘结刚度/($N \cdot m^{-3}$)	9×10^7
土壤法向粘结临界应力/ Pa	5×10^5
土壤切向粘结临界应力/ Pa	5×10^5

2.3 运动仿真设计

将在 SolidWorks 2018 中建立的国标与仿生旋耕刀三维模型导入 EDEM 2018 软件,构建长×宽×高为 900 mm×300 mm×500 mm 的土壤-旋耕刀相互作用模型(图 5),然后在土槽仿真模型内生成 24 000 个直径为 8 mm 的土壤颗粒模型。仿真分析中旋耕机刀轴转速设定为 150、200、250 r/min;前进速度为 0.5 m/s;耕深为 100 mm。整个过程分为 2 部分:0~0.6 s 在土槽仿真模型内生成土壤模型;0.6~2 s 旋耕刀分别以前进速度 0.5 m/s 以及刀轴转速 150、200、250 r/min 与土壤模型进行切削运动,仿真数据保存间隔为 0.001 s,共 6 组仿真试验,在分析板块获取试验结果,采用 0.6~2.0 s 内仿真数据,进行 2 种旋耕刀所受扭矩以及三向阻力的分析。

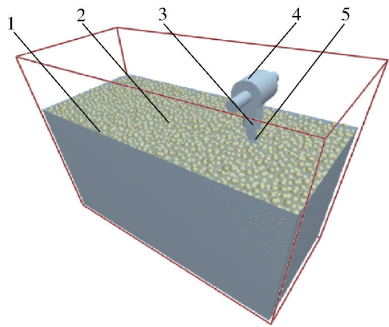


图5 土壤-旋耕刀相互作用模型

Fig. 5 Soil - rotary blade interaction model

1. 土槽仿真模型 2. 土壤模型 3. 旋耕刀固定座 4. 刀辊 5. 旋耕刀

3 室内土槽旋耕试验

2020 年 10 月在南京农业大学浦口校区农机实习中心的土槽试验台车上进行国标与仿生旋耕刀扭矩采集试验。土槽内土壤为黏土(质量分数分别为淤泥 47%、黏土 42% 和沙 11%),取自南京市永宁镇^[34]。土壤经过调湿、夯实后,控制土壤平均含水率为 16%,平均硬度为 3.21×10^5 Pa,且每次试验时土壤参数保持一致。在对整个土槽试验台车系统检查后,进行旋耕试验。

3.1 试验装置

土槽试验台车主要由电机部分、试验台车、行走导轨、土槽、旋耕机、传动系统、液压系统部分、三点悬挂机构、各种传感器、数据采集系统以及计算机等部分组成。土槽长×宽为 24 000 mm×3 000 mm。土槽试验台车长×宽×高为 2 500 mm×3 000 mm×2 000 mm,其结构简图如图 6 所示。

3.2 土槽试验

试验采用江苏清淮机械有限公司生产的旋耕机,总共安装 24 把旋耕刀。土槽试验台车旋耕行走

长度为 18 m,旋耕机采用正转且刀轴转速设定为 150、200、250 r/min 3 挡,耕深保持 100 mm,前进速度恒为 0.5 m/s,分别测量 2 种旋耕刀在试验过程中刀轴所受的扭矩。试验现场如图 7 所示。

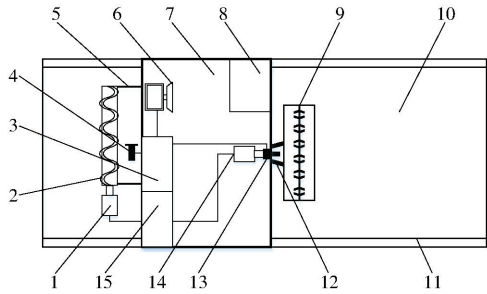


图6 土槽试验台车结构简图

Fig. 6 Structure diagram of soil bin test vehicle

1. 牵引电机 2. 牵引装置 3. 数据采集系统 4. 三维力传感器
5. 传动系统 6. 计算机 7. 土槽试验台车 8. 液压系统 9. 旋耕机 10. 土槽 11. 行走导轨 12. 三点悬挂机构 13. 扭矩传感器 14. 输出电机 15. 电机控制箱

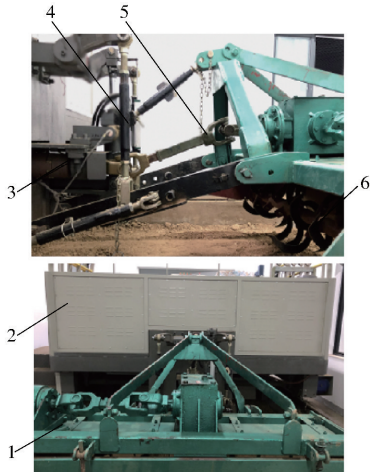


图7 旋耕试验装置

Fig. 7 Rotary tillage test device

1. 旋耕机 2. 土槽试验台车 3. 扭矩传感器 4. 三点悬挂机构
5. 万向节传动轴总成 6. 旋耕刀

4 试验结果与分析

4.1 旋耕刀扭矩分析

仿真过程中旋耕刀在工作时总体上可分为 4 个过程。过程 1,在旋耕刀未进入土壤时所受扭矩为 0,在刀轴转动下,侧切刃进入纵切状态,随着入土深度增加,扭矩增大,接着主切刃进入横切状态,在主、侧切刃与土壤共同作用时,扭矩出现骤然增加。过程 2,当旋耕刀到达最大耕深时,扭矩达到最大值。过程 3,旋耕刀越过最大耕深后,主、侧切刃逐渐退出土层,扭矩慢慢减小。过程 4,当主切刃完全退出土层时,在此过程中扭矩逐渐减小至 0。

根据运动仿真分析得到 2 种旋耕刀所受扭矩的变化规律如图 8 所示。3 种刀轴转速下国标旋耕刀

所受的平均扭矩都比仿生旋耕刀高,刀轴转速 150 r/min 时,分别为 6.28、5.72 N·m,下降了 8.87%;刀轴转速 200 r/min 时,分别为 7.75、7.32 N·m,下降了 5.47%;当刀轴转速达到 250 r/min 时,分别

为 11.03、10.49 N·m,下降了 4.89%。由图 8 可知,随着刀轴转速的增加,旋耕刀所受到的最大扭矩会逐渐变大。旋耕刀所受扭矩越大,所需功耗也越大,两者之间呈正比关系^[35]。

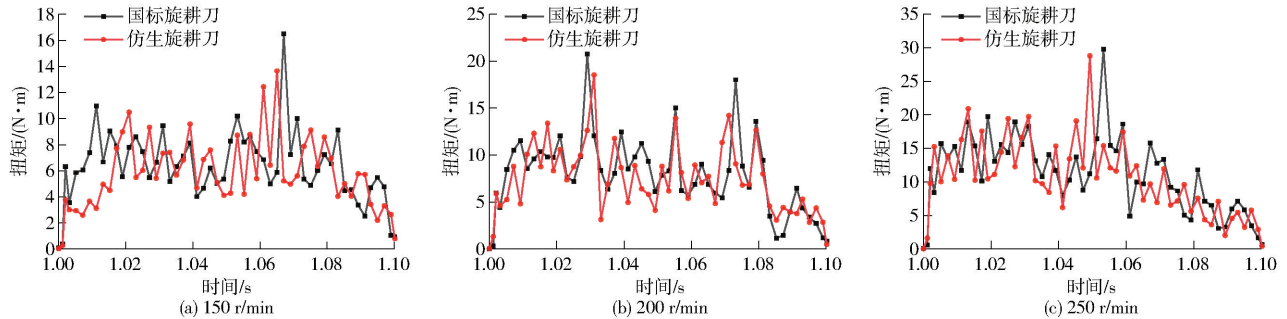


图 8 不同刀轴转速下 2 种旋耕刀所受扭矩变化曲线

Fig. 8 Torque changes of two kinds of rotary blades at different rotate speeds

理想状态下,土槽试验台车输出扭矩等于旋耕机上 24 片旋耕刀所受的扭矩总和。但实际试验中会出现各传动机构间的摩擦以及其他部件产生扭矩。本文中每次试验所产生的额外扭矩都近似为相等,故土槽试验台车输出扭矩等于所有旋耕刀所受的扭矩总和^[32]。土槽试验得到的平均扭矩信息如表 4 所示。试验得出,在土槽试验台车前进速度和耕深保持一定时,3 种刀轴转速下仿生旋耕刀受到的平均扭矩都比国标旋耕刀小,分别降低了 10.53%、4.46%、3.49%。通过将土槽试验台车输出总扭矩除以旋耕刀数目近似得出每个刀片所受到扭矩。将仿生旋耕刀试验与仿真平均扭矩结果进行对比分析,如图 9 所示,2 条曲线的相关系数为 0.997 且最大相对误差为 13.23%,旋耕刀所受的扭矩仿真值与试验值变化趋势相似,能够较准确地反映旋耕机的功耗变化规律,但是由于土槽试验受土壤中石沙、传动系统摩擦以及土槽试验台车前进阻力等因素的影响^[36],其扭矩试验值比仿真值大。

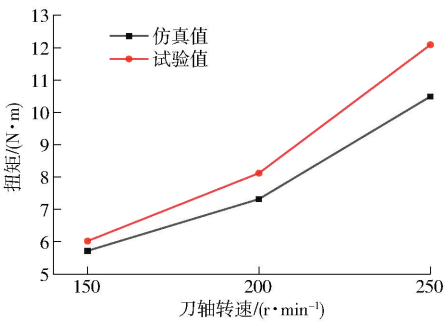


图 9 不同刀轴转速下仿生旋耕刀平均扭矩仿真值与试验值对比

Fig. 9 Comparison of simulation and experimental values of average torque of bionic rotary blade at different rotate speeds

为 Y 向、侧向作用力方向为 Z 向。则旋耕刀在土壤耕作中所受的三向阻力如图 10 所示。图中 v 为旋耕刀前进速度; ω 为旋耕刀刀轴转速; R 为旋耕刀回转半径; F_x 、 F_y 、 F_z 分别为旋耕刀所受的水平阻力、垂直阻力与侧向阻力; M 为驱动力矩。

通过仿真试验得到国标与仿生旋耕刀所受到的三向阻力变化规律如图 11 所示,在 3 种刀轴转速下

表 4 土槽试验中国标与仿生旋耕刀所受平均扭矩				
Tab. 4 Average torque of national standard and bionic rotary blade in soil bin test				
旋耕刀	前进速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	耕深/ mm	刀轴转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	平均扭矩/ ($\text{N}\cdot\text{m}$)
国标	0.5	100	150	161.52
			200	204.00
			250	300.72
仿生	0.5	100	150	144.48
			200	194.88
			250	290.16

4.2 旋耕刀三向阻力分析

在旋耕作业中,定义两种旋耕刀三向阻力方向分别为:水平作用力方向为 X 向、垂直作用力方向

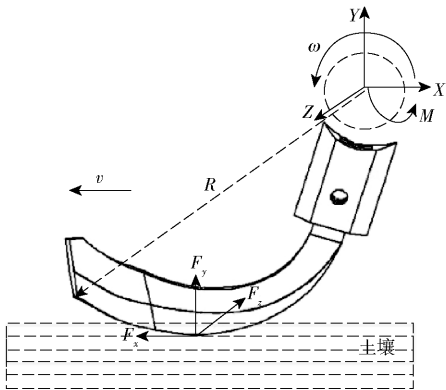


图 10 旋耕刀三向阻力定义

Fig. 10 Definition of three-axis working resistance of rotary blade

两种旋耕刀旋转 1 圈,其水平阻力 F_x 一直是正值,因为刀轴旋转方向与旋耕刀前进方向相同。3 种刀轴转速下国标旋耕刀 F_x 最大值均比仿生旋耕刀大,在刀轴转速为 150 r/min 时,仿生旋耕刀水平阻力最大值较国标旋耕刀降低了 9.91%,分别为 71.45、79.31 N;在刀轴转速为 200 r/min 时,降低了 5.78%,分别为 93.55、99.29 N;在刀轴转速为 250 r/min 时,降低了 4.95%,分别为 101.00、106.26 N。垂直阻力 F_z 呈先正后负的变化规律,主要是旋耕刀在达到最大耕深过程中向下切土,刀片受到垂直向上的阻力,

为正值;当旋耕刀从最大耕深开始出土抛送土壤时,刀片受到垂直向下的力,为负值。在刀轴转速为 150 r/min 时,仿生旋耕刀垂直阻力最大值较国标旋耕刀降低了 9.09%,分别为 53.00、58.30 N;在刀轴转速为 200 r/min 时,降低了 9.74%,分别为 58.48、64.79 N;在刀轴转速为 250 r/min 时,降低了 6.38%,分别为 70.86、75.68 N。侧向阻力 F_y 一直为负值且 3 种刀轴转速下国标旋耕刀侧向阻力最大值均比仿生旋耕刀小。

由图 12 可知,国标与仿生旋耕刀三向阻力最大

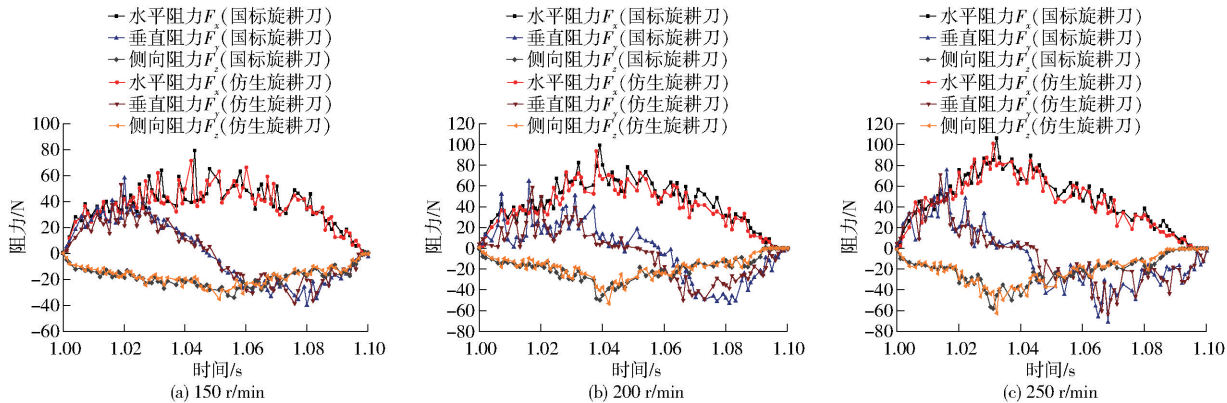


图 11 不同刀轴转速下 2 种旋耕刀三向阻力变化曲线

Fig. 11 Variation curves of three-axis working resistance of two kinds of rotary blades at different rotate speeds

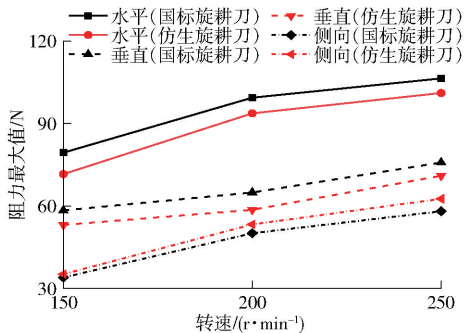


图 12 不同转速下 2 种旋耕刀三向阻力最大值变化曲线

Fig. 12 Maximum variation curves of three-axis working resistance of two kinds of rotary blades at different rotate speeds

值均随着刀轴转速的增加而升高,且仿生旋耕刀的水平阻力和垂直阻力最大值在 3 种刀轴转速下都比国标旋耕刀小,但侧向阻力最大值比国标旋耕刀大。

5 结论

(1)分析了东方螻蛄前足爪趾轮廓曲线特征,拟合 4 个爪趾上、下轮廓曲线的高斯方程的拟合度 R^2

均不小于 0.997 2,拟合误差平方和 SSE 均不大于 0.87。

(2)采用 Hertz - Mindlin with Bonding 土壤接触模型用 EDEM 2018 离散元软件构建了南方粘湿土壤-旋耕刀相互作用仿真模型,使用直径为 8 mm 的球体模拟土壤颗粒,对 2 种旋耕刀进行受力分析。

(3)旋耕刀仿真受力分析表明,国标旋耕刀与仿生旋耕刀水平阻力、侧向阻力和垂直阻力均随着刀轴转速的增加而增大,除侧向阻力以外,仿生旋耕刀受到的水平阻力和垂直阻力的最大值都比国标旋耕刀小。在刀轴转速为 150、200、250 r/min 时,仿生旋耕刀所受平均扭矩均比国标旋耕刀小,分别降低了 8.87%、5.47%、4.89%。

(4)土槽扭矩对比试验表明,在刀轴转速为 150、200、250 r/min 时,仿生旋耕刀所受平均扭矩均比国标旋耕刀小,分别降低了 10.53%、4.46%、3.49%。仿生旋耕刀所受平均扭矩的仿真值与试验值变化趋势相同,均随着刀轴转速的增加而增大,2 条曲线相关系数为 0.997,且最大相对误差为 13.23%,验证了所建立的离散元仿真模型的有效性。

参 考 文 献

[1] 田耘,金亮,赵亚祥. 旋耕机作业性能影响参数的试验研究[J]. 中国农机化学报,2016,37(8):1-4.
TIAN Yun, JIN Liang, ZHAO Yaxiang. Experimental research on the parameters impacted homework performance of rotary cultivator[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(8): 1-4. (in Chinese)
[2] 杜兆辉,陈彦宇,张姬,等. 国内外旋耕机械发展现状与展望[J]. 中国农机化学报,2019,40(4):43-47.

- DU Zhaohui, CHEN Yanyu, ZHANG Ji, et al. Development status and prospects of rotary farm machinery in domestic and abroad [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(4): 43–47. (in Chinese)
- [3] IMAN A. A torque calculator for rotary tiller using the laws of classical mechanics[J]. Soil & Tillage Research, 2017, 165: 137–143.
- [4] MUSTAFA U, CHRIS S, JOHN M F. Comparison of the discrete element and finite element methods to model the interaction of soil and tool cutting edge[J]. Biosystems Engineering, 2018, 169: 199–208.
- [5] PRATHUANG U, WATCHARACHAN S, SIRIRISAK C. Tilling tests of rotary tiller and power harrow after subsoiling[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2020, 19(6): 391–400.
- [6] 郝建军, 于海杰, 赵建国, 等. 楔形减阻旋耕刀设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 55–64.
HAO Jianjun, YU Haijie, ZHAO Jianguo, et al. Design and test of wedge drag reduction rotary blade[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 55–64. (in Chinese)
- [7] GODWIN R J. A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement force[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 97: 331–340.
- [8] 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 biomimetic rotary tillage blade based on multiple claws characteristics of mole rats[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19): 37–45. (in Chinese)
- [9] 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, 2019.
YU Jie. Bionic design of rotary blade based on rabbit's claw-toe structural characteristic[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2019. (in Chinese)
- [10] 施新泉. 科学原来如此—千姿万态的动物[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2005.
- [11] 李晓鹏, 廖敏, 胡奔, 等. 马铃薯仿生挖掘铲片及其减阻特性研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(6): 19–25, 31.
LI Xiaopeng, LIAO Min, HU Ben, et al. Study on the bionic digging shovel of potato and its reduce resistance characteristics [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(6): 19–25, 31. (in Chinese)
- [12] 张凯凯. 仿生触土试件挖掘阻力测试系统研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2018.
ZHANG Kaikai. Study on test system for mining resistance of bionic soil-touching test pieces[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [13] 李因武, 吴庆文, 常志勇, 等. 基于仿生斗齿的反铲液压挖掘机动臂仿真优化设计[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(3): 821–827.
LI Yinwu, WU Qingwen, CHANG Zhiyong, et al. Simulation and optimal design of backhoe hydraulic excavator based on bionic teeth[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(3): 821–827. (in Chinese)
- [14] 高吭. 东方螞蛄 (*Gryllotalpa orientalis Burmeister*): 特征、功能、力学及其仿生分析[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
GAO Hang. Characteristic, function, mechanics and bionic analysis of oriental mole cricket (*Gryllotalpa orientalis Burmeister*) [D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 蒋建东, 高洁, 赵颖娣, 等. 土壤旋切振动减阻的有限元分析[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 58–62.
JIANG Jiandong, GAO Jie, ZHAO Yingdi, et al. Finite element simulation and analysis on soil rotary tillage with external vibration excitation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 58–62. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120112&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.012. (in Chinese)
- [17] 于海杰. 楔形减阻旋耕刀优化设计与试验[D]. 保定: 河北农业大学, 2019.
YU Haijie. Optimal design and experiment of wedge drag reduction rotary blade [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [18] 齐慧. 仿形旋耕刀优化设计与试验研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2017.
QI Hui. The copying rotary tillage blade optimization design and experimental research [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [19] 张峻霞, 张凯凯, 张琰, 等. 仿螞蛄运动特性的土壤挖掘机构设计[J]. 机械设计与制造, 2020(8): 180–183, 187.
ZHANG Junxia, ZHANG Kaikai, ZHANG Yan, et al. Design of a soil-digging mechanism based on the motion characteristics of mole crickets [J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(8): 180–183, 187. (in Chinese)
- [20] 杨玉婉. 鼯鼠前足多趾组合结构切土性能研究与仿生旋耕刀设计[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
YANG Yuwan. Study on the soil-cutting performance of multi-claw combination of mole rats and design of biomimetic rotary tillage blade [D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [21] KAIRI F, MASAYUKI O, HIROMU H, et al. Bearing characteristic of journal bearing applied biomimetics [J]. Tribology International, 2020, 150: 256–265.
- [22] 付君, 张屹晨, 陈志, 等. 基于黄牛舌尖丝状乳突结构的仿生脱粒齿形设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 167–176.
FU Jun, ZHANG Yichen, CHEN Zhi, et al. Bionic design and experiment of threshing tooth based on structure of cattle apex tongue filiform papillae [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 167–176. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190717&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.017. (in Chinese)

- [23] 中国国家标准化管理委员会. 旋耕机械刀和刀座:GB/T5669—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [24] 丁启朔,任骏,BELAL E A,等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(3):38–48. DING Qishuo,REN Jun,BELAL E A,et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):38–48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170305&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.005. (in Chinese)
- [25] 赵淑红,王加一,杨超,等. 保护性耕作破茬碎土刀设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):57–68. ZHAO Shuhong,WANG Jiayi,YANG Chao,et al. Design and experiment of stubble chopper under conservation tillage design and experiment of stubble chopper under conservation tillage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9):57–68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190907&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.007. (in Chinese)
- [26] 祝英豪,夏俊芳,曾荣,等. 基于离散元的稻田板旋耕功耗预测模型研究[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(10):42–50. ZHU Yinghao,XIA Junfang,ZENG Rong,et al. Prediction model of rotary tillage power consumption in paddy stubble field based on discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(10):42–50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201006&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.006. (in Chinese)
- [27] UCGUL M,FIELKE J M,CHRIS S. 3D DEM tillage simulation:validation of a hysteretic spring(plastic) contact model for a sweep tool operation in a cohesionless soil[J]. Soil & Tillage Research,2014,144:220–227.
- [28] CHEN Y,LARS J M,TAVS N. A discrete element model for soil-sweep interaction in three different soils[J]. Soil & Tillage Research,2013,126:34–41.
- [29] 丁启朔,李杨,BELAL E A,等. 基于田间摄像的多参数水稻土深松扰动行为与效应研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(10):44–55. DING Qishuo,LI Yang,BELAL E A,et al. Subsoiler-induced paddy soil disturbance and effects based on video-assisted multi-index quantification[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(10):44–55. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191005&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.005. (in Chinese)
- [30] 周华,李栋,刘政源,等. 秸秆旋埋还田后空间分布效果仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):69–77. ZHOU Hua,LI Dong,LIU Zhengyuan,et al. Simulation and experiment of spatial distribution effect after straw incorporation into soil by rotary burial[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(9):69–77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190908&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.008. (in Chinese)
- [31] 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)
- [32] 郭俊,张庆怡,MUHAMMAD S M,等. 仿鼯鼠足趾排列的旋耕-秸秆粉碎锯齿刀片设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(6):43–50. GUO Jun,ZHANG Qingyi,MUHAMMAD S M,et al. Design and experiment of bionic mole's toe arrangement serrated blade for soil-rototilling and straw-shattering[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(6):43–50. (in Chinese)
- [33] 张永良. 基于离散元的逆转旋耕施肥播种机抛土性能仿真及试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2012. ZHANG Yongliang. Simulation and experimental research on throwing performance of reverse rotary tillage fertilizer planter based on discrete element method[D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2012. (in Chinese)
- [34] 方会敏,姬长英,张庆怡,等. 基于离散元法的旋耕刀受力分析[J]. 农业工程学报,2016,32(21):54–59. FANG Huimin,JI Changying,ZHANG Qingyi,et al. Force analysis of rotary blade based on distinct element method[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(21):54–59. (in Chinese)
- [35] 曾荣,李东东,祝英豪,等. 旋转耕作部件性能测试试验台设计与应用[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(5):88–97. ZENG Rong,LI Dongdong,ZHU Yinghao,et al. Design and application of performance test bench for rotary tiller components[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(5):88–97. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200509&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.009. (in Chinese)
- [36] 周华,张文良,杨全军,等. 滑切型自激振动减阻深松装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(5):71–78. ZHOU Hua,ZHANG Wenliang,YANG Quanjun,et al. Design and experiment of sliding cutting self-excited vibration drag reduction subsoiling device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(5):71–78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190508&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.008. (in Chinese)