

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.015

基于鼯鼠多趾结构特征的仿生切土刀片设计与试验

杨玉婉^{1,2} 佟金^{1,2} 马云海^{1,2} 李默^{1,2} 蒋啸虎^{1,2} 李金光^{1,2}

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025)

摘要: 为降低土壤耕作阻力, 分析了鼯鼠前肢手掌的多趾组合结构特征, 得到鼯鼠多趾组合结构是一种多窄齿组合结构, 且相邻齿间间距可调整, 最终确定了多趾组合结构的数学模型。基于该模型, 设计了具有仿生结构特征的切土刀片。通过土槽试验, 采用四因素三水平的二次正交回归试验方法, 分析仿生结构元素 m 和 n 、土壤含水率和切土倾角对水平阻力的影响, 得到土壤含水率和切土倾角对水平阻力的影响更显著, 最优仿生结构元素 m 为 5、 n 为 1.75。通过比较传统和仿生刀片在切土倾角 $10^\circ \sim 90^\circ$ 和土壤含水率 $10\% \sim 30\%$ 下的水平阻力, 得到仿生几何结构对刀片切土的临界倾角无显著影响, 但土壤含水率对其有显著影响: 当土壤含水率为 10% 和 20% 时, 临界倾角均为 30° 左右; 当土壤含水率为 30% 时, 临界倾角均在 $40^\circ \sim 50^\circ$ 之间。然而, 仿生几何结构对刀片所受的水平阻力有显著影响, 在相同的土壤含水率下, 仿生刀片的水平阻力总小于传统刀片的水平阻力; 当土壤含水率为 10% 、 20% 、 30% 时, 仿生刀片的水平阻力分别减小 $11.48\% \sim 39.16\%$ 、 $17.81\% \sim 28.00\%$ 和 $11.19\% \sim 33.26\%$ 。此外, 水平阻力的变化与土壤内聚力具有极大的相关性, 研究表明土壤含水率为 $10\% \sim 20\%$ 时, 仿生刀片具有更好的切土性能。

关键词: 鼯鼠; 多趾组合; 仿生; 切土阻力; 设计

中图分类号: S222; Q6-3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)12-0122-07

Design and Experiment of Bionic Soil-cutting Blade Based on Multi-claw Combination of Mole Rat

YANG Yuwan^{1,2} TONG Jin^{1,2} MA Yunhai^{1,2} LI Mo^{1,2} JIANG Xiaohu^{1,2} LI Jinguang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Bionics Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China

2. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: Soil tillage is an important operation to create a better soil condition for crop growing. However, larger draught forces exist in the tillage operation so that it is urgent to need some methods to solve these problems. Mole rat has the outstanding digging performance, and its multi-claw combination would inspire the development of new efficient tillage implements. The mathematical model of the multi-claw combination was established, and bionic soil-cutting blades were designed for investigating the effects of the bionic structural elements (m and n), soil moisture content and rake angle on the draught force. By the quadratic regression orthogonal test, it was found that the soil moisture content and rake angle had more significant effects on the draught force. Optimal combination with the least draught force was $m = 5$ and $n = 1.75$. Through the comparison test of the draught force between conventional and bionic soil-cutting blades at the rake angle of 10° to 90° and the soil moisture content of 10% to 30% , the bionic structural elements had no significant effects on the critical rake angle of blades, but soil moisture content had a significant effect on that. Particularly, the bionic blade showed the best cutting performance. When the soil moisture content was 10% , 20% and 30% , the draught force of the bionic blade was decreased by 11.48% to 39.16% , 17.81% to 28.00% and 11.19% to 33.26% , respectively. Moreover, the bionic blade had better soil cutting performance at the soil moisture content of $10\% \sim 20\%$.

Key words: mole rat; multi-claw combination; bionic; soil-cutting force; design

收稿日期: 2018-07-10 修回日期: 2018-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51505184)、国家重点研发计划项目(2017YFD0701103)、中国博士后面上项目(801161040414)和高等学校学科创新引智计划项目(B16020)

作者简介: 杨玉婉(1992—),女,博士生,主要从事农业工程仿生理论与技术研究,E-mail: yangyw16@mails.jlu.edu.cn

通信作者: 佟金(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事农业工程仿生理论与技术和仿生摩擦学研究,E-mail: jtong@jlu.edu.cn

0 引言

土壤耕作中,水平阻力是评价农具耕作性能的重要指标之一^[1]。基于摩尔-库伦力学理论建立了简单耕作部件切土力学模型^[2-5]。而且按简单基本耕作部件工作深度与宽度的比值划分为 3 种类型,即:宽刀(耕深/耕宽比值小于 0.5)、窄齿(耕深/耕宽比值大于 1 且小于 6)、极窄齿(耕深/耕宽比值大于 6)。GODWIN^[6]研究了水平阻力与耕深/耕宽比值的关 系,发现对于极窄齿水平阻力随耕宽的增加呈正比例增大;对于窄齿水平阻力随着耕宽的增加而增大,但增长率逐渐减小;宽齿的水平阻力随着耕宽的增加而缓慢地线性增加。可以看出,农具的几何结构影响着水平阻力的变化。

相关研究表明农作物生产过程中约有一半的能量用于土壤耕作^[7]。如此高的能耗是由于农具在耕作中承受着极高的水平阻力,为了降低水平阻力,设计了许多新型农具结构。设计不同弧度的切土刀片^[8],通过有限元法仿真试验发现,切土刀片弧度越大,在土壤中移动所受阻力越小;仿生非光滑切土刀片^[9-10]是基于土壤挖掘动物的非光滑表面结构特征而设计的,试验表明,该仿生非光滑刀片具有减粘降阻的效果。基于鼯鼠爪趾结构特征的仿生旋耕-破茬刀片^[11]具有较好的切土和破茬效果。对于农业耕作部件,减小土壤阻力的方式有很多,如电渗减阻、振动降阻、电磁降阻和仿生降阻^[12-15]。

鼯鼠的每个手掌都有 5 个宽大而锋利的爪趾。当鼯鼠挖掘土壤时,5 个爪趾张开并处于同一平面协同工作,从而实现高效切土,这种结构被称为多趾组合结构。这种多趾组合结构具有独特而高效的切土性能,可用于设计新型的耕作部件,以实现减阻降耗的耕作目的。本文基于鼯鼠多趾组合结构,设计具有仿生结构特征的切土刀片,通过土槽试验研究该多趾组合特征结构对水平切土阻力的影响。

1 鼯鼠多趾组合结构特征分析

鼯鼠及放大 7.5 倍的前肢手掌五趾组合结构如图 1 所示。每个爪趾尺寸和相邻爪趾间间距是多趾组合特征结构的重要参数,趾长 L 是指爪趾的纵向长度;由于爪趾在水平方向上尺寸差异较小,因而选择爪趾中间位置作为趾宽 W ;相邻趾间间距 Δx ,是相邻两爪趾中心线间的横向距离。鼯鼠多趾组合结构特征几何参数如表 1 所示。

为了便于分析鼯鼠前肢手掌多趾组合结构特

征,定义两个比值

$$m = \frac{L}{W} \quad (1)$$

$$n = \frac{\Delta x}{W} \quad (2)$$

式中 m ——趾长与趾宽的比值

n ——相邻爪趾间间距与趾宽的比值

鼯鼠前肢手掌多趾组合结构可表示为

$$w_0 = 0.5 \frac{L_1}{m_1} + n_{12} \frac{L_2}{m_2} + n_{23} \frac{L_3}{m_3} + n_{34} \frac{L_4}{m_4} + n_{45} \frac{L_5}{m_5} + 0.5 \frac{L_5}{m_5} \quad (3)$$

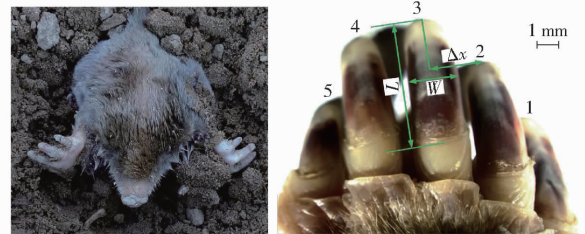
式中 w_0 ——鼯鼠前肢手掌的宽度,mm

L_i ——趾长,mm, $i=1,2,3,4,5$

m_i ——趾长与趾宽比值

n_{pq} ——相邻爪趾间间距与趾宽的比值

由表 1(其中 $q=p+1$; $p=1,2,3,4$)可知, m 值范围为 2.63 ~ 3.41, n 值范围为 1.12 ~ 1.60,由于鼯鼠挖掘过程中趾间距因实际情况而调整,因此 n 取值不固定,变化范围较大。由此可知,鼯鼠前肢手掌多趾组合结构是一种多窄齿组合结构,且相邻齿间间距可调整。



(a) 鼯鼠

(b) 放大 7.5 倍的前肢爪趾

图 1 鼯鼠及其多趾组合结构

Fig. 1 Mole rat and its multi-claw combination structure

表 1 鼯鼠多趾组合结构特征的几何参数

Tab. 1 Geometrical parameters of multi-claw combination

爪趾序号	趾长 L/mm	趾宽 W/mm	比值 m	相邻趾间距 $\Delta x/\text{mm}$	比值 n	
1	6.47	2.34	2.76	1 st 和 2 nd	3.86	1.60
2	7.83	2.42	3.24	2 nd 和 3 rd	2.89	1.12
3	8.82	2.59	3.41	3 rd 和 4 th	3.04	1.17
4	7.99	2.46	3.25	4 th 和 5 th	3.22	1.31
5	5.43	2.06	2.63			

2 仿生切土刀片设计

根据窄齿耕深与耕宽的比值大于 1 且小于 6,确定趾长与趾宽比值 m 的设计范围为 1 ~ 6;根据 GODWIN 等^[16-17]对多窄齿排列对土壤阻力和扰动的研究可知,多窄齿组合切土是通过多窄齿间的共同作用使得土壤破裂,齿间距是该共同作用中的重要参数,取值范围为 1 ~ 2,因而确定相邻趾间横向

间距与趾宽比值 n 的设计范围为 1~2。本文基本型切土刀片尺寸为 80 mm × 50 mm × 10 mm, 双刃口, 刃口角 α 均为 15°, 如图 2a 所示。基于鼯鼠前肢手掌多趾组合结构特征, 以 m 和 n 作为仿生结构元素, 根据多趾组合结构(式 3)设计具有仿生多趾组合结构特征的切土刀片。为简化设计, 仿生切土刀片中每个窄齿的 m 值和相邻齿间间距 n 值均相

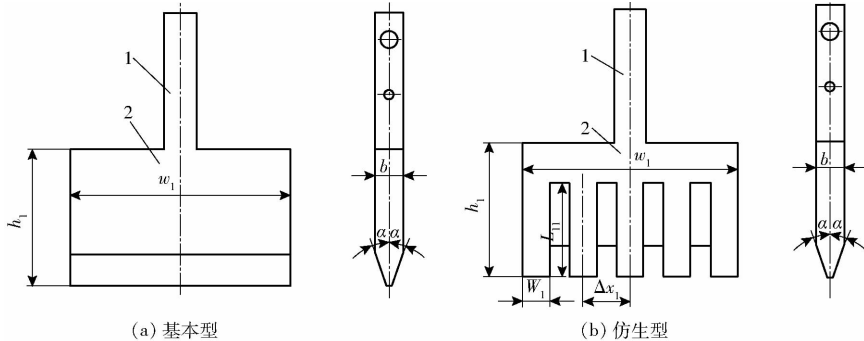


图2 切土刀片

Fig. 2 Soil-cutting blade

1. 刀柄 2. 刀体

3 土槽试验

3.1 试验设备与试验方法

试验在吉林大学仿生教育部重点实验室的小型土槽内完成。土槽箱 1 000 mm(长) × 420 mm(宽) × 400 mm(深)为试验提供一个可重复的土壤条件, 土壤为沙壤土(46% 砂土、33% 壤土和 21% 粘土), 是一种典型的东北耕地土壤。在土槽箱内, 土壤层尺寸为 1 000 mm(长) × 420 mm(宽) × 260 mm(深)。刀片材料为 45 钢, 刃口通过打磨处理。

土槽测试系统由运动控制装置、角度控制装置和数据采集装置组成, 如图 3 所示。运动控制装置由伺服电机(三相, 200 W)、滑轮运动副和滑动板组成, 用于带动刀片在土壤中水平移动。角度控制装置可调节刀片在倾角 0°~90° 范围内工作, 由角度调节板来实现。数据采集装置由拉力传感器和计算机组成, 通过数据采集器和数据接口将计算机与伺服电机、拉力传感器相连, 用 VB 软件编写程序, 软

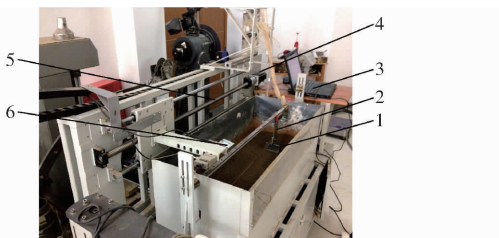


图3 土槽测试系统

Fig. 3 Soil bin test unit

1. 刀片 2. 角度调节板 3. 计算机 4. 电机 5. 丝杠滑板系统
6. 拉力传感器

等, 每个齿长 L_{11} 均为 35 mm, 如图 2b 所示。仿生切土刀片结构可根据方程式(3)简化为

$$w_1 = (1 + Nn) \frac{L_{11}}{m} \quad (4)$$

式中 w_1 ——切土刀片的宽度, mm

L_{11} ——窄齿长度, mm

N ——窄齿个数

件主要可以控制电机转速和转向, 进而控制触土部件的运动速度和方向, 通过数据采集器接收力传感器采集的信息, 可以得到部件的运动位移与拉力, 进而控制系统。

在土槽试验中, 刀片在 3 种不同土壤含水率和 3 种不同切土倾角下进行切土, 其中土壤含水率分别为 10%、20% 和 30%, 切土倾角分别为 30°、50° 和 70°。耕深和前进速度分别保持在 35 mm 和 500 mm/min。每组试验重复 3 次, 取平均值作为结果。为保证试验的可重复性, 每次试验后都需人工翻土处理, 并将土壤刮平和压实, 用 SC-900 型坚实度仪测量坚实度, 用 TDR-300 型水分仪测量土壤含水率, 保证每次试验前的土壤硬度和土壤含水率的误差均在 10% 以内。

3.2 试验方案

通过正交试验的方法, 分析仿生结构元素对水平阻力的影响。试验选择了影响切土阻力的 4 个因素: 土壤含水率、切土倾角、仿生结构元素 m 和 n , 试验指标为水平阻力。每个试验因素各取 3 水平, 在 Design-Expert 8.0.6 软件中, 基于 Box-Behnken^[18] 设计原理, 通过二次正交回归试验方法分析仿生刀片的切削能力。试验因素编码如表 2 所示。

4 试验结果与分析

试验方案为四因素三水平试验, 试验结果如表 3 所示, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 为因素编码值。水平阻力反映了仿生刀片的切土性能, 阻力越小, 切土性能越好, 反之, 切土性能越差。表 3 中, 最小的切土阻力

表 2 因素编码
Tab. 2 Coding of factors

编码	因素			
	m	n	土壤含水率/%	切土倾角/(°)
-1	2.0	1.25	10	30
0	3.5	1.50	20	50
1	5.0	1.75	30	70

表 3 试验方案和试验结果

Tab. 3 Test scheme and results of coded test

试验 序号	因素				水平阻力 y/N
	比值 x_1	比值 x_2	土壤含水率 x_3	切土倾角 x_4	
1	0	-1	0	1	28.87
2	0	0	0	0	28.57
3	-1	1	0	0	24.37
4	0	0	-1	-1	15.41
5	1	1	0	0	20.50
6	-1	0	1	0	32.47
7	0	0	0	0	27.57
8	-1	-1	0	0	21.91
9	0	1	0	1	26.32
10	0	-1	0	-1	20.72
11	1	0	1	0	30.00
12	0	0	1	-1	32.65
13	-1	0	-1	0	22.38
14	0	-1	1	0	32.62
15	0	-1	-1	0	24.64
16	1	0	0	1	26.26
17	-1	0	0	-1	20.47
18	0	0	-1	1	26.43
19	0	0	0	0	29.57
20	0	1	-1	0	20.12
21	0	0	0	0	26.57
22	1	0	0	-1	15.51
23	-1	0	0	1	28.80
24	0	1	0	-1	17.04
25	0	0	0	0	30.57
26	0	0	1	1	41.94
27	0	1	1	0	30.07
28	1	0	-1	0	22.76
29	1	-1	0	0	24.28

为 15.41 N, 相应地 $m = 3.5$ 、 $n = 1.50$ 、土壤含水率为 10% 和切土倾角为 30°。

对试验结果进行方差分析(表 4), F 值和 P 值作为方差分析的指标, F 值越大, P 值越小, 表明分析结果的可靠性越高。该模型的 F 值为 13.57, 表明模型显著, 而且 $P < 0.0001$, 可以认为模型是合理而显著的。影响因素 x_3 、 x_4 、 x_1^2 、 x_2^2 、 x_3^2 和 x_4^2 相应的 P 值均小于 0.05, 表明其为显著项, 而剩余的影响因素均为非显著项。失拟项的 P 值为 0.2319, 表明二次多

项式正交回归方程的拟合结果是可以接受的。该拟合方程为

$$y = 28.57 - 0.93x_1 - 1.22x_2 + 5.67x_3 + 4.73x_4 - 1.56x_1x_2 - 0.71x_1x_3 + 0.61x_1x_4 + 0.49x_2x_3 + 0.28x_2x_4 - 0.43x_3x_4 - 3.34x_1^2 - 3.12x_2^2 + 1.88x_3^2 - 2x_4^2 \quad (5)$$

表 4 试验结果的方差分析

Tab. 4 Variance analysis of draught forces

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	883.68	14	63.12	13.57	<0.0001
x_1	10.28	1	10.28	2.21	0.1592
x_2	17.82	1	17.82	3.83	0.0705
x_3	385.50	1	385.50	82.88	<0.0001
x_4	268.96	1	268.96	57.82	<0.0001
x_1x_2	9.75	1	9.75	2.10	0.1697
x_1x_3	2.03	1	2.03	0.44	0.5199
x_1x_4	1.47	1	1.47	0.32	0.5834
x_2x_3	0.97	1	0.97	0.21	0.6548
x_2x_4	0.32	1	0.32	0.068	0.7979
x_3x_4	0.74	1	0.74	0.16	0.6956
x_1^2	72.42	1	72.42	15.57	0.0015
x_2^2	63.26	1	63.26	13.60	0.0024
x_3^2	22.95	1	22.95	4.93	0.0434
x_4^2	26.01	1	26.01	5.59	0.0330
残差	65.12	14	4.65		
失拟	55.12	10	5.51	2.20	0.2319
纯误差	10.00	4	2.50		
总离差	948.80	28			

应用响应曲面法分析 4 种影响因素(土壤含水率、切土倾角、仿生结构元素 m 和 n) 及其交互作用对水平阻力的影响, 如图 4 所示。在分析过程中, 设置其中的 2 个影响因素为 0 水平, 然后讨论其余 2 个因素对水平阻力的影响。

(1) 仿生结构元素 m 和 n 对水平阻力的影响

仿生结构元素 m 和 n 对水平阻力的影响可表示为

$$y_{12} = 28.57 - 0.93x_1 - 1.22x_2 - 1.56x_1x_2 - 3.34x_1^2 - 3.12x_2^2 \quad (6)$$

如图 4a 所示, 水平阻力随着变量 x_1 和 x_2 从水平 -1 变化到水平 0 均增大, 而随着变量 x_1 和 x_2 从水平 0 变化到水平 1 均减小, 因此在 $(x_1, x_2) = (0, 0)$ 位置处, 水平阻力达到最大值 28.57 N, 并由方程式(6)可知, 水平阻力在 $(x_1, x_2) = (1, 1)$ 位置处达到最小值 18.40 N。相对于变量 x_1 来说, 变量 x_2 对水平阻力的影响显著。

(2) 土壤含水率和切土倾角对水平阻力的影响
土壤含水率和切土倾角对水平阻力的影响可表

示为

$$y_{34} = 28.57 + 5.67x_3 + 4.73x_4 - 0.43x_3x_4 + 1.88x_3^2 - 2x_4^2 \quad (7)$$

如图4b所示,水平阻力随着变量 x_3 从水平-1变化到水平0时变化不大,从水平0变化到水平1

时迅猛增加;水平阻力随着变量 x_4 从水平-1变化到水平0时增加较快,从水平0变化到水平1时增加较慢。因此水平阻力在 $(x_3, x_4) = (-1, -1)$ 位置处达到最小值。变量 x_3 和 x_4 对水平阻力的影响都显著。

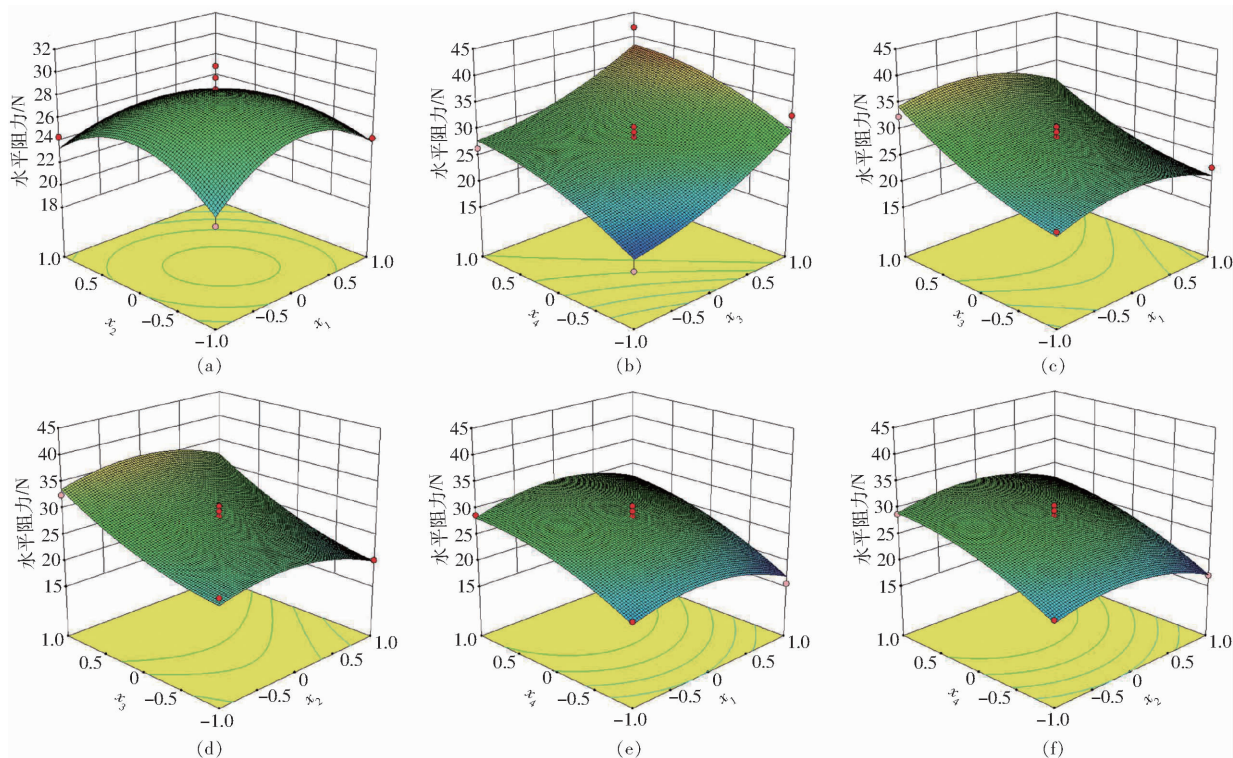


图4 各个因素对水平阻力影响的响应曲面

Fig. 4 Response surface of effects of factors on draught force

(3)土壤含水率和仿生结构元素 m 对水平阻力的影响

土壤含水率和仿生结构元素 m 对水平阻力的影响可表示为

$$y_{13} = 28.57 - 0.93x_1 + 5.67x_3 - 0.71x_1x_3 - 3.34x_1^2 + 1.88x_3^2 \quad (8)$$

如图4c所示,水平阻力随着变量 x_1 从水平-1变化到水平0均增加,而随着变量 x_1 从水平0变化到水平1降低;水平阻力随着变量 x_3 从水平-1变化到水平1均增加。变量 x_3 对水平阻力的影响显著。相对于变量 x_3 来说,变量 x_1 对水平阻力的影响不显著。

(4)土壤含水率和仿生结构元素 n 对水平阻力的影响

土壤含水率和仿生结构元素 n 对水平阻力的影响可表示为

$$y_{23} = 28.57 - 1.22x_2 + 5.67x_3 + 0.49x_2x_3 - 3.12x_2^2 + 1.88x_3^2 \quad (9)$$

如图4d所示,水平阻力随着变量 x_2 从水平-1变化到水平0均增加,而随着变量 x_1 从水平0变化

到水平1降低;水平阻力随着变量 x_3 从水平-1变化到水平1均增加。变量 x_3 对水平阻力的影响显著。相对于变量 x_3 来说,变量 x_2 对水平阻力的影响不显著。

(5)切土倾角和仿生结构元素 m 对水平阻力的影响

切土倾角和仿生结构元素 m 对水平阻力的影响可表示为

$$y_{14} = 28.57 - 0.93x_1 + 4.73x_4 + 0.61x_1x_4 - 3.34x_1^2 - 2x_4^2 \quad (10)$$

如图4e所示,水平阻力随着变量 x_1 从水平-1变化到水平0均增加,而随着变量 x_1 从水平0变化到水平1降低;水平阻力随着变量 x_4 从水平-1变化到水平1均增加。变量 x_4 对水平阻力的影响显著。相对于变量 x_4 来说,变量 x_1 对水平阻力的影响不显著。

(6)切土倾角和仿生结构元素 n 对水平阻力的影响

切土倾角和仿生结构元素 n 对水平阻力的影响可表示为

$$y_{24} = 28.57 - 1.22x_2 + 4.73x_4 + 0.28x_2x_4 - 3.12x_2^2 - 2x_4^2 \quad (11)$$

如图 4f 所示,水平阻力随着变量 x_2 从水平 -1 变化到水平 0 均增加,而随着变量 x_2 从水平 0 变化到水平 1 降低;水平阻力随着变量 x_4 从水平 -1 变化到水平 1 均增加。变量 x_4 对水平阻力的影响显著。相对于变量 x_4 来说,变量 x_2 对水平阻力的影响不显著。

5 对比试验结果与分析

传统刀片和优化仿生刀片 ($m = 5, n = 1.75$) 在不同切土倾角和土壤含水率下切削土壤时,测量并记录各自的水平阻力,如图 5 所示。当切土倾角逐渐增加时,水平阻力先减小后增加,这意味着刀片在临界倾角时会有最小水平阻力。对于传统刀片来说,当土壤含水率为 10% 和 20% 时,临界倾角约为 30° ;当土壤含水率为 30% 时,临界倾角在 $40^\circ \sim 50^\circ$ 范围内。对于仿生刀片,也有同样的现象。这说明仿生结构元素不改变刀片切土时的临界倾角,然而土壤含水率对其有明显影响。

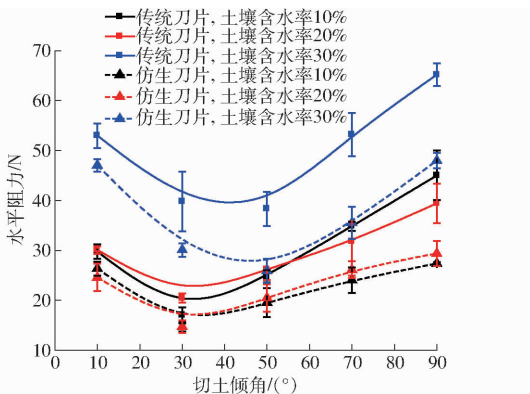


图 5 不同切土倾角和土壤含水率下传统刀片和仿生刀片的水平阻力

Fig. 5 Draught forces of conventional and bionic blades at different rake angles and soil moisture contents

对于传统刀片来说,当土壤含水率从 10% 增大到 20% 时,水平阻力没有明显变化,这与 GHOSH^[19] 研究旋耕刀在土壤含水率为 10% ~ 28% 范围内切土时,扭矩没有明显变化的现象类似;当土壤含水率为 30% 时,水平阻力明显增大。水平阻力的变化与土壤机械性能具有着较大关系,根据 STAFFORD^[20] 研究,土壤内聚力是引起水平阻力变化的主要因素,而其他土壤机械性能参数对水平阻力的影响不明

显。通过三轴试验得到,当土壤含水率从 10% 增大到 20% 时,土壤内聚力从 2.26 kPa 增加到 2.35 kPa;当土壤含水率为 30% 时,土壤内聚力为 3.68 kPa。可以看出,土壤内聚力在土壤含水率为 10% 和 20% 时变化不大,而土壤含水率增大为 30% 时其值迅速增加,这说明了水平阻力的变化与土壤内聚力具有极大的关系,也暗示了农业耕作部件在合适的土壤含水率下耕作会有较小的耕作阻力,在本文土壤条件下,土壤含水率在 10% ~ 20% 范围内时比较适合耕作。

仿生几何结构对刀片所受的水平阻力有显著影响。在相同的土壤含水率下,仿生刀片的水平阻力总小于传统刀片的水平阻力。当土壤含水率为 10%、20% 和 30% 时,仿生刀片的水平阻力分别减小 11.48% ~ 39.16%、17.81% ~ 28.00% 和 11.19% ~ 33.26%。可以看出,仿生刀片具有较好的切土性能。

6 结论

(1) 对鼯鼠前肢手掌多趾组合结构特征进行分析,得到鼯鼠前肢手掌多趾组合结构是一种多窄齿组合结构,且相邻齿间间距可调整。定义趾长与趾宽的比值为 m 、相邻趾间距与趾宽的比值为 n ,并确定了鼯鼠多趾组合结构的数学模型。

(2) 根据鼯鼠多趾组合结构的数学模型,以及仿生结构元素 m 的设计范围为 1 ~ 6 和 n 的设计范围为 1 ~ 2,设计出了具有仿生结构特征的切土刀片。

(3) 基于 Box - Behnken 设计原理,分析了土壤含水率、切土倾角、仿生结构元素 m 和 n 对刀片水平阻力的影响,得到了二次多项式方程来预测水平阻力的变化,且土壤含水率和切土倾角对水平阻力的影响更加显著。通过响应曲面法得到优化的仿生结构为 $m = 5, n = 1.75$ 。

(4) 比较了传统和仿生切土刀片在不同切土倾角和土壤含水率的水平阻力,得到仿生结构元素不改变刀片切土时的临界倾角,然而土壤含水率对其有明显影响;仿生刀片具有较好的切土性能,在相同的土壤含水率下,仿生刀片的水平阻力总小于传统刀片的水平阻力,且在土壤含水率为 10% ~ 20% 时会更适合切土,水平阻力可达到较小值。

参 考 文 献

- 1 KUSHWAHA R L, ZHANG Z X. Evaluation of factors and current approaches related to computerized design of tillage tools: a review [J]. Journal of Terramechanics, 1998, 35(2): 69 - 86.
- 2 REECE A R. The fundamental equation of earth-moving mechanics [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,

- 1964, 179(6):16-22.
- 3 HETTIARATCHI D R P, REECE A R. Symmetrical three-dimensional soil failure [J]. *Journal of Terramechanics*, 1967, 4(3):45-67.
- 4 McKEYES E, ALI O S. The cutting of soil by narrow blades [J]. *Journal of Terramechanics*, 1977, 14(2):43-58.
- 5 GODWIN R J, SPOOR G. Soil failure with narrow tines [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1977, 22(4):213-228.
- 6 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.
- 7 ZHANG J, KUSHWAHA R L. Dynamic analysis of a tillage tool; Part I. Finite element method [J]. *Canadian Agricultural Engineering*, 1998, 40:287-292.
- 8 ARMIN A, SZYSZKOWSKI W, FOTOUHI R. 3D finite element analysis of curved blade's mechanics in farming tillage operations [C]//*Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2016:1-6.
- 9 REN L Q, HAN Z W, LI J Q, et al. Effects of non-smooth characteristics on bionic bulldozer blades in resistance reduction against soil [J]. *Journal of Terramechanics*, 2002, 39(4):221-230.
- 10 REN L Q, HAN Z W, LI J Q, et al. Experimental investigation of bionic rough curved soil cutting blade surface to reduce soil adhesion and friction [J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 85:1-12.
- 11 TONG J, JI W F, JIA H L, et al. Design and tests of biomimetic blades for soil-rototilling and stubble-breaking [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2015, 12:495-503.
- 12 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. 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.
- ZHANG Jinbo, TONG Jin, MA Yunhai. Design and tests of bionic subsoiler for reducing soil resistance [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(4):141-145. (in Chinese)
- 13 佟金, 张清珠, 常原, 等. 仿生镇压辊减粘降阻的有限元分析与试验验证[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(7):85-92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140714&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.014.
- TONG Jin, ZHANG Qingzhu, CHANG Yuan, et al. Finite element analysis and test verification of the viscosity-reducing and resistance-reducing abilities of bionic roller [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7):85-92. (in Chinese)
- 14 任露泉, 梁云虹. 仿生学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- 15 施新泉. 原来如此——千姿百态的动物[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2005.
- 16 GODWIN R J, SPOOR G, SOOMRO M S. The effect of tine arrangement on soil forces and disturbance [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1984, 30(1):47-56.
- 17 GODWIN R J, O' DOGHERTY M J. Integrated soil tillage force prediction models [J]. *Journal of Terramechanics*, 2007, 44(1):3-14.
- 18 BOX G E P, BEHNKEN D W. Some new three level designs for the study of quantitative variables [J]. *Technometrics*, 1960, 2(4):455-475.
- 19 GHOSH B N. The power requirement of a rotary cultivator [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1967, 12(1):5-12.
- 20 STAFFORD J V. The performance of a rigid tine in relation to soil properties and speed [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1979, 24(1):41-56.

(上接第 121 页)

- 15 董福龙, 周宏平, 易克传. 基于产品语义分析的自激对冲喷头概念设计[J]. *农机化研究*, 2019, 41(3):199-203.
- DONG Fulong, ZHOU Hongping, YI Kechuan. Conceptual design of self-excited collision nozzle based on semantic analysis[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 41(3):199-203. (in Chinese)
- 16 ASHGRIZ N, GIVI P. Binary collision dynamics of fuel droplets[J]. *International Journal of Heat & Fluid Flow*, 1987, 8(3):205-210.
- 17 伍沅. 撞击流:原理·性质·应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- 18 李旭, 吴春笃, 王光亮, 等. 低流量扇形雾喷头的设计[J]. *农业机械学报*, 2002, 33(4):38-41.
- LI Xu, WU Chundu, WANG Guangliang, et al. Design of a low atomizer with fan-shaped spraying[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2002, 33(4):38-41. (in Chinese)
- 19 李秉礼. 植保机械[M]. 北京: 科学普及出版社, 1984.
- 20 董向丽, 王思芳, 孙家隆. 农药科学使用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- 21 ZHU J X, MANYELE S V. Radial nonuniformity index (RNI) in fluidized beds and other multiphase flow systems[J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2001, 79(2):203-213.
- 22 赵娜, 余永刚, 陆欣, 等. 对撞喷嘴喷雾场周向分布特性的实验研究[J]. *弹道学报*, 2013, 25(3):95-99.
- ZHAO Na, YU Yonggang, LU Xin, et al. Experiment study on circumferential distribution characteristics in spray field of impinging jet injector[J]. *Journal of Ballistics*, 2013, 25(3):95-99. (in Chinese)