

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.005

芯铧式开沟器仿生设计与试验

贾洪雷^{1,2} 孟凡豪¹ 刘立晶³ 史 嵩⁴ 赵佳乐^{1,2} 庄 健^{1,2}

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022;
3. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 4. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100)

摘要: 针对高速作业条件下芯铧式开沟器阻力过大的问题,基于狗獾犬齿曲面的高效低阻贯穿结构,提出了一种开沟器仿生设计方法。对狗獾犬齿进行三维扫描,获取点云数据,采用 Matlab 软件拟合了 4 条狗獾犬齿曲线,设计并加工了 4 种滑动式开沟装置,并进行了对比试验分析。在作业深度 50 mm 条件下,以开沟装置类型、作业速度为试验因素,以水平方向作业阻力为主要指标,以开沟装置开出沟形的沟深、沟宽、侧垄高和侧垄宽为次要指标,进行了土槽试验。试验结果表明,在同一作业速度下,优化的各滑动式开沟装置的阻力均比标准芯铧式开沟器小。在作业速度为 3.6、5.4、7.2 km/h 的条件下,优化的滑动式开沟装置比标准芯铧式开沟器作业阻力分别降低 8.04%、8.15%、8.71%;标准芯铧式开沟器与优化的滑动式开沟装置所开沟形的沟深、沟宽、侧垄高和侧垄宽的变异系数均低于 5%。

关键词: 芯铧式开沟器; 仿生; 狗獾犬齿; 作业阻力

中图分类号: S223.1⁺9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)04-0044-06 OSID: 

Biomimetic Design and Experiment of Core-share Furrow Opener

JIA Honglei^{1,2} MENG Fanhao¹ LIU Lijing³ SHI Song⁴ ZHAO Jiale^{1,2} ZHUANG Jian^{1,2}

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China
2. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Changchun 130022, China
3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China
4. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Ji'nan 250100, China)

Abstract: In view of the problem that the resistance of the core-share furrow opener is too large under high speed operation, an optimal design method of furrow opener based on the bionics principle was proposed based on the efficient and low resistance penetration structure of the dog-badger canine tooth surface. China northeast farmed badger was selected as bionic biological samples, it was carried out on the upper right canine of badger advance disinfection after treatment for 3D scanning and obtained the complete point cloud data, and then through the Matlab software, fitting curve of the four best badger canine based on the above four design was obtained and the four kinds of slide furrowing device were processed, finally it was compared with the traditional core-share furrow opener through contrast test analysis. Under the condition that the operating depth was 50 mm, the type of opening device and operating speed were taken as the test factors, the horizontal operating resistance was taken as the main index, and the trench depth, trench width, ridge height and ridge width of the trench device were taken as the secondary index to conduct the soil groove test. The experimental results showed that the resistance of each optimized sliding trench opener was lower than that of the standard core-share furrow opener at the same operating speed. At operating speed of 3.6 km/h, 5.4 km/h and 7.2 km/h, the operating resistance of the optimal sliding trench device can be reduced by up to 8.04%, 8.15% and 8.71%, respectively, compared with the standard core-share furrow opener. The variation coefficient of furrow depth, furrow width, side ridge height and side ridge width by standard core-share furrow openers and optimized sliding furrow openers were all lower than 5%.

Key words: core-share furrow opener; bionic; canine teeth of badger; working resistance

收稿日期: 2019-11-04 修回日期: 2019-12-17
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700702)和吉林省自然科学基金项目(20180101090JC)
作者简介: 贾洪雷(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事农业全程机械化与保护性耕作研究,E-mail: jiah@vip.163.com
通信作者: 庄健(1981—),男,高级工程师,博士,主要从事农业机械关键零部件研究,E-mail: zhuangjian_2001@163.com

0 引言

开沟器是农业播种机械必不可少的触土部件,在播种机工作时,开沟器开出种沟,引导种子和肥料进入一定深度的土层中。传统的芯铍式开沟器结构简单,制造成本低,入土性能较好,对播前整地的要求不高,但其开沟阻力较大,制约了播种机速度的提升^[1]。近年来,随着现代农业的发展,农业装备的作业效率不断提高,播种机的作业速度也在不断提高,这对开沟器的设计制造提出了新的要求。为了提高作业速度,在稳定功耗及保证作业质量的前提下,需要尽可能减小开沟器的作业阻力。而标准芯铍式开沟器因作业阻力大,不能满足高速作业的要求。

目前,对开沟器作业阻力的研究大多是对原有开沟器相关参数进行优化设计,从而实现减阻效果。赵艳忠等^[2]研究发现,随着双圆盘开沟器圆盘直径及夹角的增大,开沟阻力呈现线性增大的趋势。马延武^[3]对鸭嘴式开沟器进行减阻设计,通过单因素试验和二次正交回归旋转组合试验,得出鸭嘴式开沟器阻力最小的参数组合为:入土角 43°、入土隙角 6°、铲体长度 145 mm、铲体宽度 21 mm。曹晓东^[4]改进设计了芯铍式开沟器,将芯铍面由凹面改为凸面,明显减小土壤扰动,促进种子的萌发和生长。

在高效低耗农机部件结构的研究中,仿生学为研究者提供了新思路。依据农业机械触土部件的实际需求,仿生学设计方法运用单元仿生、多元耦合仿生的理论及技术,结合触土部件作业规律和结构特点,进行农业机械部件的设计。目前,多种仿生脱附减阻部件已在农业机械上得到了应用,并显示出广阔的发展前景^[5-6]。白景峰等^[7-8]基于狗獾爪趾曲线设计了一种振动式深松铲,其耕作阻力比原有深松铲明显减小。马云海等^[9]研制了一种仿生波纹型开沟器,具有良好的减黏降阻效果,但其对土壤的有效扰动大于普通开沟器。赵淑红等^[10-11]根据旗鱼头部的流线型曲线,设计了仿旗鱼头部曲线型开沟器,并进行了离散元仿真和室内土槽试验,证明仿旗鱼头部曲线型开沟器可降低工作阻力,并能有效减小土壤扰动。林福东^[12]研究发现,狗獾犬齿尖锐锋利,长期的自然进化使得牙齿可以以最低的切削阻力撕裂食物。狗獾犬齿齿尖部分极为锋利和坚硬,在其捕食中起到了关键性作用,对食物有较好的穿透能力、刺入能力和撕裂能力。

国内对于农业机械触土部件的仿生学优化大多是在原结构的基础上通过改变其表面性能进行减阻脱附,对触土部件的整体结构进行仿生学重构的较

少。本文通过提取狗獾犬齿曲线,研究芯铍式开沟器成型原理,整体重构 4 种滑动式开沟装置,旨在探讨基于仿生曲线的减阻开沟器整体设计方法,并通过试验验证滑动式开沟装置的作业效果以及减阻效果,为开沟器的优化设计提供参考。

1 滑动式开沟装置脊线的获取

狗獾犬齿尖锐锋利,长期的自然进化使其牙齿可以以最小的贯入阻力刺穿猎物^[12]。本研究选取中国东北地区人工养殖的 5 龄雄獾,其质量为 12.8 kg,身体状况良好,无疾病。将其麻醉后取出獾口右上方犬齿(图 1)并置于体积分数为 28% 的酒精溶液中进行消毒处理,在浸泡 2~3 h 后用蒸馏水反复清洗 20~30 次,最后置于烧杯中在室温条件下自然风干。



图 1 狗獾犬齿实物图

Fig. 1 Real picture of badgers' canine teeth

狗獾犬齿干燥后,在其表面均匀喷洒 D-76 显影剂,使用三维扫描仪(柯尼卡美能达 RANGE7 型)进行扫描,获得犬齿完整的 3D 点云数据。在狗獾捕食过程中,犬齿将猎物刺穿并撕裂,其对猎物的作用分为 4 个过程:预剪切(剪破猎物的表皮)、剪切(剪破猎物的真皮)、挤压(将强度相对较低的皮下组织挤压至两侧)、扩张(将猎物彻底撕裂)。如图 1 所示,狗獾犬齿前后两端的主刃线(图 2 中 Y_1 和 Y_2)是与猎物最早接触的部分,也是对猎物剪切作用最强的部分;狗獾犬齿左右两端中间位置处的侧刃线(图 2 中 Y_3 和 Y_4)对猎物也有一定的剪切和挤压作用^[13]。且狗獾犬齿只有齿尖以上约 15 mm 的部分处在牙龈以外,该部分犬齿具备上述剪切、挤压及扩张的功能。因此,如图 2 所示,分别提取犬齿的前后左右 4 个端面正中处齿尖以上高度 $H=15$ mm 的 4 条轮廓线 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 ,获得与 4 条轮廓线对应的 4 组点云数据。将 4 组点云数据分别导入 Matlab 进行数据光滑处理后,利用 cftool 工具包计算 1~5 阶多项式下的拟合图形,发现三阶多项式拟合时效果较好^[14-15],因此选择函数 $\text{polyfit}(x,y,3)$ 进行三阶多项式拟合。拟合后的 4 条曲线数学方程如表 1 所示。

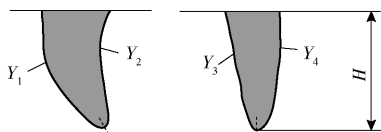


图2 用于开沟器设计的犬齿区域

Fig. 2 Canine tooth area for opener design

表1 拟合曲线数学方程

Tab. 1 Mathematical equations of fitting curves

序号	拟合曲线方程	<i>x</i> 范围
1	$Y_1 = 0.000\,343\,2x^3 - 0.027\,83x^2 + 0.873\,6x + 2.056$	$0 \leq x \leq 89.2$
2	$Y_2 = 0.000\,113\,1x^3 - 0.012\,24x^2 + 0.585\,5x + 2.783$	$0 \leq x \leq 124$
3	$Y_3 = 0.000\,196\,9x^3 - 0.010\,97x^2 + 0.415\,8x + 2.527$	$0 \leq x \leq 92.4$
4	$Y_4 = 0.000\,129\,9x^3 - 0.014\,68x^2 + 0.703\,2x + 0.709$	$0 \leq x \leq 120.9$

2 滑动式开沟装置仿生设计

以标准芯铧式开沟器为基础,将获得的仿生学曲线1~4作为滑动式开沟装置的脊线,设计芯铧式开沟器新结构。如图3所示,芯铧式开沟器在构型时,以水平面上的底部轮廓线为基础,以脊线作为引导线(图3a),扫描形成芯铧面和侧翼面(图3b)。加厚曲面形成实体(图3c)并设计出入土隙角和安装孔(图3d)实现整体建模。根据农艺要求及农业机械设计手册^[1]可知:入土角过大,入土性能差。入土角过小,芯铧强度减弱,一般以15°~25°为宜;一般入土隙角为5°,过大会使沟底不平,过小则会使入土性能变差;铧高过高会发生壅土,增加作业阻力,

一般为80~140 mm;芯铧幅宽取决于播种宽度,而窄行播种宽度一般为40~60 mm;芯铧式开沟器脊线为等曲率的圆弧,其半径一般250~350 mm为宜;开沟器长度不能过大,过长会降低播种机的通过性。根据上述原则将0号标准芯铧式开沟器以及2、3、4号滑动式开沟装置尺寸设计如下:入土隙角 $\varepsilon = 5^\circ$,幅宽 $B = 40\text{ mm}$,厚度 $\delta = 2\text{ mm}$,铧高 $h = 100\text{ mm}$ (为保证各开沟器铧高相等,各条脊线在水平方向上的取值范围并不相同,表1已列出),长度 $l = 200\text{ mm}$ 。芯铧面在作业方向上的正投影面积完全相同,皆为4 000 mm²。0~4号开沟装置的区别在于脊线的不同以及脊线不同引起的入土角不同(15°~25°)和芯铧面的不同。如图4所示:0号开沟器的脊线为半径 $R = 250\text{ mm}$ 的圆弧,1~4号滑动式开沟装置的脊线分别为表1所示的1~4号曲线。因此,上述5个开沟装置作业效果和作业阻力的差异完全是由脊线不同引起的。

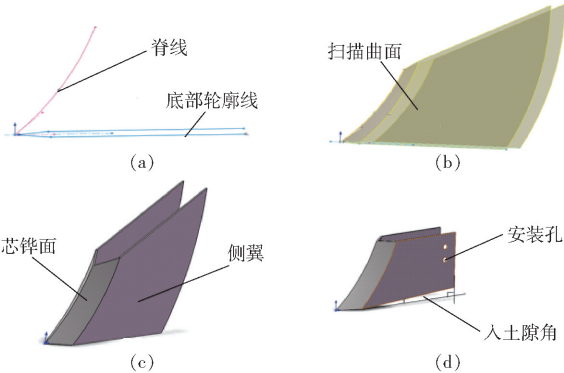


图3 开沟器建模过程

Fig. 3 Opener modeling process

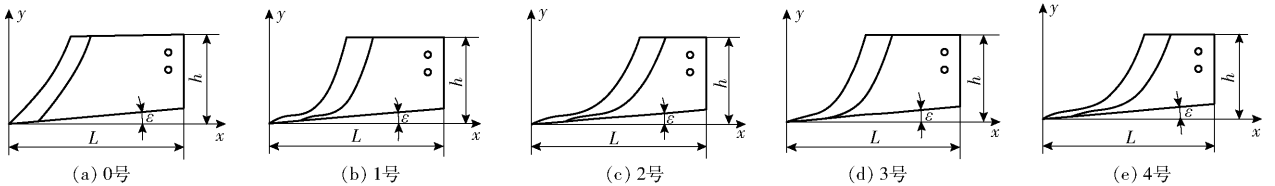


图4 0~4号开沟器结构示意图

Fig. 4 Schematics of no. 0~4 openers

3 土槽试验

3.1 试验方案

采用数控铣削的方法对淬火后的45号钢进行加工,得到参与试验的样品如图5所示,其中0号为标准芯铧式开沟器,1~4号为与表1所述曲线相对应的基于狗獾犬齿曲线设计的滑动式开沟装置。为研究不同的作业速度和不同脊线的开沟器对作业质量和作业阻力的影响,在室内土槽中对0~4号开沟器进行了对比试验,选取耕作方向的开沟作业阻力为主要指标,开沟器开出沟形的侧垄宽、侧垄高、沟

宽、沟深作为次要指标^[16]。为便于试验设计,使用的开沟器设置5个水平(分别对应0号标准芯铧式开沟器、1~4号滑动式开沟装置);因为目前常用标准芯铧式开沟器作业速度为5 km/h,结合土槽试验车最高时速10 km/h的试验条件,将作业速度设置3个水平:3.6、5.4、7.2 km/h,交叉分组,因此本试验共有15个水平组合。东北垄作大豆播种深度一般为30~50 mm^[17],故本次试验将开沟深度统一设置为50 mm。将加工后的5个开沟器样品分别装在机架上,应用土槽试验车对其进行试验。通过分析试验结果,验证獾犬

齿用于开沟器设计的效果。试验方案设计及实际试验结果如表 2 所示。

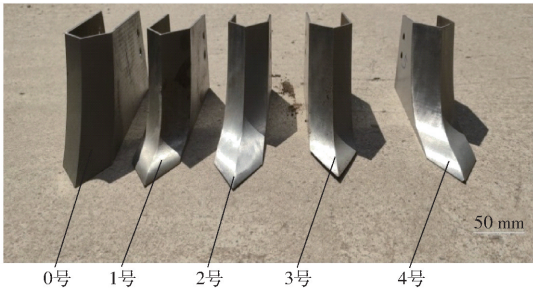


图 5 0~4 号开沟器样品
Fig. 5 No. 0~4 openers sample

表 2 试验方案与受力结果

Tab. 2 Test scheme and results

作业速度/ (km·h ⁻¹)	试验段 序号	开沟器序号					N
		0	1	2	3	4	
		0	1	2	3	4	
3.6	1	51.23	47.07	49.18	43.09	45.54	
	2	51.19	47.11	49.21	43.05	45.49	
	3	50.99	46.97	48.34	42.87	44.61	
	4	51.86	47.05	49.39	43.67	45.63	
	均值	51.32	47.05	49.03	43.17	45.32	
5.4	1	77.41	71.18	73.39	67.03	69.35	
	2	76.99	70.93	72.35	66.64	68.29	
	3	77.53	71.08	73.52	67.14	69.41	
	4	77.32	70.01	72.64	66.94	68.57	
	均值	77.31	70.80	72.98	66.94	68.91	
7.2	1	118.19	107.37	109.51	103.07	105.34	
	2	118.17	107.92	109.48	103.05	105.13	
	3	118.31	107.55	109.52	103.18	105.99	
	4	117.97	108.35	110.02	104.69	106.42	
	均值	118.16	107.79	109.63	103.50	105.72	

3.2 试验条件

试验于 2019 年 4 月在吉林大学农机实验室室内土槽进行,土槽长 50 m、宽 3 m、深 0.8 m。试验前使用旋耕机将土槽土壤旋耕一次,再用镇压辊将土槽土壤整平。之后对土壤的物理性质进行测量,包括容积密度、土壤坚实度、含水率以及温度。

使用容积为 200 cm³的不锈钢圆筒测量深度在 0~50 mm 和 50~100 mm 范围内的土壤容积密度。每个深度范围内任意收集 4 组土壤样本。用 SKG-01 型微波炉将 8 组土壤样本在 110 ℃ 条件下干燥 12 h。计算土壤的容积密度

$$\rho = \frac{M}{V}$$

式中 ρ ——土壤的容积密度,g/cm³
 M ——每组样本的土壤质量,g
 V ——不锈钢圆筒的容积,cm³

通过 SPECTRUM SC-900 型便携式土壤坚实度速测仪分别测量 4 次深度为 50、100 mm 的土壤坚

实度,使用土壤温度计分别测量 4 次 0~100 mm 范围内的土壤温度;通过 SPECTRUM TDR-300 型土壤水分测定仪分别测量 4 次 0~100 mm 范围内的土壤平均含水率;各项结果如表 3 所示。依照中国土壤质地分类标准^[18],试验用土槽中土壤类型为轻黏土,土槽中土壤颗粒组成为:细黏粒(粒径 0~0.002 mm)占 17.9%、粗粉粒(粒径 0.002~0.05 mm)占 39.4%、砂粒(粒径 0.05~1 mm)占 33.7%。

表 3 试验前土槽土壤部分物理性质参数

Tab. 3 Some soil physical properties from study site measured before experiments

参数	深度/ mm	序号				平均 值
		1	2	3	4	
容积密度/(g·cm ⁻³)	0~50	1.227	1.126	1.134	1.217	1.176
	50~100	1.312	1.291	1.237	1.309	1.287
土壤坚实度/kPa	50	586	579	582	587	583.5
	100	931	928	934	931	931
含水率/%	0~100	13.9	13.8	13.7	13.8	13.8
温度/℃	0~100	15.3	15.4	15.5	15.3	15.4

3.3 试验方法

如图 6 所示,作业阻力采用土槽试验车上的测力系统进行测量。将 0~4 号开沟器在 3 种作业速度下分别作业一次,共计 15 次。每次作业后整平土壤,并调整开沟器位置,避开上次作业的开沟区。每次试验距离为 40 m,包括前后两端各 4 m 的调整区和中间部分 32 m 的数据采集区(每 8 m 为一个数据统计区间)。试验数据统计结果如表 2 所示。

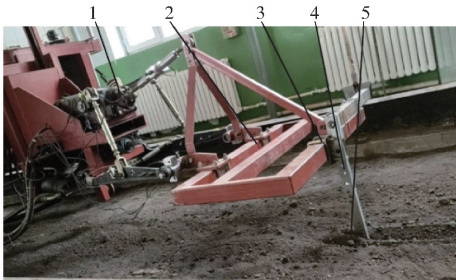


图 6 开沟器阻力测试图

Fig. 6 Diagram of resistance test for opener

1. 测力系统 2. 三点悬挂架 3. U 型螺栓 4. 可调高连接杆
5. 滑动式开沟装置

3.4 试验结果

3.4.1 作业阻力分析

0~4 号开沟装置在各个速度和深度下的平均作业阻力如图 7 所示。由图 7 可知,开沟装置作业时在前进方向上所受到的作业阻力随着作业速度的增加而增加,在 3.6 km/h 时各开沟装置所受水平阻力最小,在 7.2 km/h 时各开沟装置所受阻力最大;

在同一作业速度下,3 号滑动式开沟装置受到的阻力最小,0 号标准芯铧式开沟器受到的阻力最大,各个滑动式开沟装置的阻力均比标准芯铧式开沟器小,这说明基于仿生学曲线设计的滑动式开沟装置具有减阻效果。在 3.6、5.4、7.2 km/h 的作业条件下,3 号滑动式开沟装置相对标准芯铧式开沟器阻力分别降低 8.04%、8.15%、8.71%。

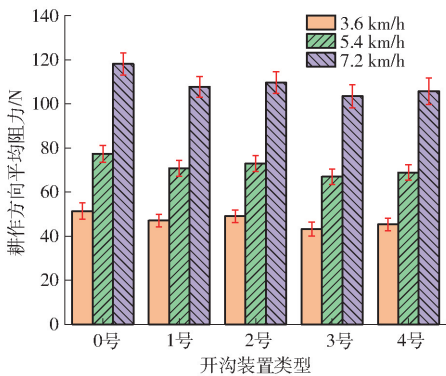


图 7 0~4 号开沟器在不同作业速度下平均阻力

Fig.7 Average resistance of no. 0~4 openers at different speeds

为进一步研究开沟器类型对工作阻力的影响,通过 SPSS 24 对试验数据进行方差分析^[19-20],开沟器水平方向所受阻力为唯一试验指标。结合表 2 所述试验方案和试验结果,由表 4 可知,不同作业速度、不同开沟器类型对作业方向上阻力的影响极显著, $P_c<0.05$,说明开沟装置的类型对平均作业阻力影响显著; $P_d<0.05$,说明作业速度对平均作业阻力也具有显著影响。由表 5 可知,不同类型的开沟装置的水平方向平均作业阻力显著不同,当作业速度相同时,其在作业方向上所受阻力从小到大依次为 3 号滑动式开沟装置、4 号滑动式开沟装置、1 号滑动式开沟装置、2 号滑动式开沟装置、0 号标准芯铧式开沟器。

表 4 主体间效应检验统计					
Tab.4 Statistics of effect test between subjects					
源	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F	P
修正模型	39 625.907	6	6 604.318	4 656.135	<0.000 1
截距	345 115.987	1	345 115.98	243 311.539	<0.000 1
c	857.118	4	214.280	151.070	<0.000 1
d	38 768.789	2	19 384.394	13 666.266	<0.000 1
误差	75.176	53	1.418		
总计	384 817.070	60			
修正后总计	39 701.083	59			

3.4.2 沟形参数的对比

在设计开沟器时,0~4 号开沟器的长、宽、高皆相等,在前进方向上的投影面积也相等,因此 5 种开沟器作业后的沟形并无明显差别。经试验验证,所设计开沟器开出沟型为图 8 所示的 V 形沟(a 为侧

表 5 开沟装置类型多重比较						
Tab.5 Multiple comparison of types of openers N						
开沟器序号	个案数	子集				
		1	2	3	4	5
3	12	71.201 7				
4	12	73.314 2				
1	12	75.215 8				
2	12	77.212 5				
0	12	82.263 3				
显著性		1	1	1	1	1

垄宽, b 为侧垄高, m 为沟宽, n 为沟深),在对沟型测量时,评价沟形质量的指标^[21-23]如图 8 所示,测量采用分段测量取平均值(每隔 8 m 测量一次,每次试验测量 5 次取平均值)的方法。5 种开沟器在作业速度 5.4 km/h、开沟深度 50 mm 时开出的沟形轮廓参数平均值如表 6 所示。由于开沟器设计时,开沟器的芯铧面正投影面积相等,开沟器的长和宽也都相等,试验时开沟深度均调节至 50 mm,结合图 8 和表 6 可知,0~4 号开沟器开出的沟形并无显著差别。沟宽的变异系数最小,说明 5 个开沟器分别作业后沟宽最为稳定;侧垄高变异系数最大,说明开沟器类型对沟形侧垄高的影响最大,因为不同芯铧面的开沟器在进行作业时,各个芯铧面曲率不同引起对土壤的抬升作用^[24-25]不同,导致被挤出土壤在两侧堆积量不同而引起的。

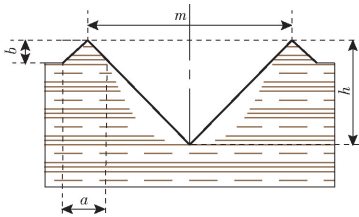


图 8 沟形轮廓参数示意图

Fig.8 Schematic of groove profile parameters

表 6 5 种开沟器开出的沟形参数平均值				
Tab.6 Groove shape parameters of five kinds of openers				
开沟器序号	a/mm	b/mm	m/mm	h/mm
0	40.0	10.0	150.0	55.0
1	39.5	9.0	149.0	53.0
2	39.8	9.2	148.4	55.3
3	39.5	9.4	148.1	54.0
4	39.8	9.1	149.3	54.0
均值	39.72	9.34	148.96	54.26
标准差	0.217	0.397	0.750	0.915
变异系数/%	0.55	4.26	0.50	1.69

4 结论

(1)滑动式开沟装置具有明显的减阻效果。在

作业深度 50 mm 条件下,减阻最明显的是 3 号曲线,在 3.6、5.4、7.2 km/h 的作业速度下,3 号滑动式开沟装置相对 0 号标准芯铧式开沟器阻力分别降低 8.04%、8.15%、8.71%。

(2)在 3 种作业速度下,各开沟器所受平均阻力由小到大顺序皆相同,依次为 3 号滑动式开沟装置、4 号滑动式开沟装置、1 号滑动式开沟装置、2 号

滑动式开沟装置、0 号标准芯铧式开沟器。3 号开沟器为最优结构。

(3)依据狗獾犬齿的 4 条拟合曲线和芯铧式开沟器的成型原理,设计了 4 种滑动式开沟装置。土槽试验表明,0~4 号开沟器开出的沟形并无显著差别,沟形的沟深、沟宽、侧垄高、侧垄宽的变异系数均低于 5%。

参 考 文 献

[1] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007: 373-378.

[2] 赵艳忠,王运兴,禹栋栋. 双圆盘开沟器结构参数对作业性能影响研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(11): 44-50. ZHAO Yanzhong, WANG Yunxing, YU Dongdong. Study on the effect of double discs opener structural parameters on the working performance[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(11): 44-50. (in Chinese)

[3] 马延武. 播种机开沟器参数优化与试验研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2018. MA Yanwu. Optimization and experimental research on opener parameters of seeder[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)

[4] 曹晓东. 芯铧式开沟器结构优化及试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018. CAO Xiaodong. Structural optimization and experimental study of the core share type furrow opener[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)

[5] 贾洪雷,郑健,赵佳乐,等. 2BDB-6(110)型大豆仿生智能耕播机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 93-107. JIA Honglei, ZHENG Jian, ZHAO Jiale, et al. Design and experiment of 2BDB-6(110) soybean bionic intelligent till-sowing machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 93-107. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180511&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.011. (in Chinese)

[6] 董铭强. 仿生学在农机减阻中的应用[J]. 农业科技与装备, 2014(2): 30-32. DONG Mingqiang. Application of bionics in reducing resistance of agricultural machinery[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2014(2): 30-32. (in Chinese)

[7] 白景峰,李博,吕秀婷,等. 基于狗獾爪趾的仿生深松铲结构设计与试验[J]. 农机化研究, 2016, 38(4): 175-179. BAI Jingfeng, LI Bo, LÜ Xiuting, et al. Structure design and test of the badger claws bionic subsoiler[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(4): 175-179. (in Chinese)

[8] 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)

[9] 马云海,马圣胜,贾洪雷,等. 仿生波纹形开沟器减黏降阻性能测试与分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 36-41. MA Yunhai, MA Shengsheng, JIA Honglei, et al. Measurement and analysis on reducing adhesion and resistance of bionic ripple opener[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 36-41. (in Chinese)

[10] 赵淑红,刘宏俊,谭贺文,等. 仿旗鱼头部曲线型开沟器设计与性能试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 32-39. ZHAO Shuhong, LIU Hongjun, TAN Hewen, et al. Design and performance experiment of opener based on bionic sailfish head curve[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 32-39. (in Chinese)

[11] 赵淑红,谭贺文,张先民,等. 新型锐角开沟器的设计及数值模拟[J]. 农机化研究, 2017, 39(11): 44-48, 58. ZHAO Shuhong, TAN Hewen, ZHANG Xianmin, et al. Design and numerical simulation of new acute angle opener[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(11): 44-48, 58. (in Chinese)

[12] 林福东. 獾牙齿特性及其仿生应用[D]. 长春: 吉林大学, 2014. LIN Fudong. Characteristics of badger teeth and their bionic applications[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)

[13] YUKIO K. Numerical simulation of canine retraction by sliding mechanics[J]. American Journal of Orthodontics & Dentofacial Orthopedics, 2004, 12(7): 542-551.

[14] 唐家德. 基于 MATLAB 的非线性曲线拟合[J]. 计算机与现代化, 2008(6): 15-19. TANG Jiade. Nonlinear curve fitting based on MATLAB[J]. Computer and Modernization, 2008(6): 15-19. (in Chinese)

[15] 耿爱成. 曲线拟合的方法[J]. 价值工程, 2017, 36(31): 182-184. GENG Aicheng. Method of curve fitting[J]. Value Engineering, 2017, 36(31): 182-184. (in Chinese)

[16] 潘世强. 基于离散元法的芯铧式开沟器优化设计与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015. PAN Shiqiang. Research on the optimization design and the experiment of the core ploughshare furrow opener based on the discrete element method[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)

[17] 朱秀章,邸艳波. 大豆栽培管理技术要点[J]. 农业与技术, 2019, 39(19): 90-91. ZHU Xiuzhang, DI Yanbo. Key techniques of soybean cultivation and management[J]. Agriculture and Technology, 2019, 39(19): 90-91. (in Chinese)

- [27] 徐国伟, 吴长付, 刘辉, 等. 秸秆还田与氮肥管理对水稻养分吸收的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 191–195.
XU Guowei, WU Changfu, LIU Hui, et al. Effects of straw residue return and nitrogen management on nutrient absorption of rice[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 191–195. (in Chinese)
- [28] 袁玲, 张宣, 杨静, 等. 不同栽培方式和秸秆还田对水稻产量和营养品质的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(2): 350–359.
YUAN Ling, ZHANG Xuan, YANG Jing, et al. Effects of different cultivation methods and straw incorporation on grain yield and nutrition quality of rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(2): 350–359. (in Chinese)
- [29] 严奉君, 孙永健, 马均, 等. 秸秆覆盖与氮肥运筹对杂交稻根系生长及氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 23–35.
YAN Fengjun, SUN Yongjian, MA Jun, et al. Effects of straw mulch and nitrogen management on root growth and nitrogen utilization characteristics of hybrid rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 23–35. (in Chinese)
- [30] TARAFDAR J C, MEENA S C, KATHJU S. Influence of straw size on activity and biomass of soil microorganisms during decomposition[J]. European Journal of Soil Biology, 2001, 37(3): 157–160.
- [31] 董珊珊, 窦森, 林琛茗, 等. 玉米秸秆在土壤中的分解速率及其对腐殖质组成的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2016, 38(5): 579–586.
DONG Shanshan, DOU Sen, LIN Chenming, et al. Decomposition rate of corn straw in soil and its effects on soil humus composition[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2016, 38(5): 579–586. (in Chinese)
- [32] 王秋菊, 焦峰, 刘峰, 等. 秸秆粉碎集条深埋机械还田模式对玉米生长及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 153–159.
WANG Qiuju, JIAO Feng, LIU Feng, et al. Effect of straw pulverization and concentrated deep-buried into field on growth and yield of maize[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 153–159. (in Chinese)
- [33] 闫超. 水稻秸秆还田腐解规律及土壤养分特性的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
YAN Chao. Studies on decomposition regularity of returning rice straw and soil nutrient properties[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [34] 曹莹菲, 张红, 刘克, 等. 不同处理方式的作物秸秆田间腐解特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 212–219.
CAO Yingfei, ZHANG Hong, LIU Ke, et al. Decomposition characteristics of crop residues among different agricultural treatments[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 212–219. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160930&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.030. (in Chinese)

(上接第49页)

- [18] 吴克宁. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 227–241.
WU Kening. Classification of soil texture and its application in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(1): 227–241. (in Chinese)
- [19] 周兆丁, 吕锟, 沈瑾, 等. 统计软件 SPSS 相关分析及应用[J]. 电脑知识与技术, 2019, 15(20): 301–302.
ZHOU Zhaoding, LÜ Kun, SHEN Jin, et al. Correlation analysis and application of statistical software SPSS [J]. Computer Knowledge and Technology, 2019, 15(20): 301–302. (in Chinese)
- [20] 徐向宏, 何明珠. 试验设计与 Design-Expert, SPSS 应用[M]. 北京: 科学技术出版社, 2010.
- [21] 刘晓鹏, 肖文立, 马磊, 等. 油菜联合直播机组合式船型开沟器设计与开沟质量试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 79–87.
LIU Xiaopeng, XIAO Wenli, MA Lei, et al. Design and ditching quality experiment on combined ship type opener of direct rapeseed seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 79–87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171110&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.010. (in Chinese)
- [22] 赵淑红, 谭贺文, 王加一, 等. 多功能集成式播种开沟器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 58–67.
ZHAO Shuhong, TAN Hewen, WANG Jiayi, et al. Design and experiment of multifunctional integrated seeding opener[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 58–67. (in Chinese)
- [23] 王磊, 廖宜涛, 张青松, 等. 油麦兼用型精量宽幅免耕播种机仿形凿式开沟器研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 63–73.
WANG Lei, LIAO Yitao, ZHANG Qingsong, et al. Design on profiling chisel opener of precision broad width no-tillage planter for rapeseed and wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 63–73. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191107&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.007. (in Chinese)
- [24] 贾洪雷, 郑嘉鑫, 袁洪方, 等. 仿形滑刀式开沟器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 16–24.
JIA Honglei, ZHENG Jiaxin, YUAN Hongfang, et al. Design and experiment of profiling sliding-knife opener[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4): 16–24. (in Chinese)
- [25] 王超, 刘从京, 李洪文, 等. 非对称式大小圆盘开沟装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 28–36.
WANG Chao, LIU Congjing, LI Hongwen, et al. Design and experiment of asymmetric large-small double disc ditching device[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 28–36. (in Chinese)