

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.009

# 密植果园开沟施肥机开沟刀片设计与试验

康建明<sup>1,2</sup> 李树君<sup>3</sup> 杨学军<sup>1,4</sup> 刘立晶<sup>1,4</sup> 王长伟<sup>4</sup> 刘晓秋<sup>4</sup>

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 新疆农垦科学院机械装备研究所, 石河子 832000;  
3. 中国机械工业集团有限公司, 北京 100080; 4. 现代农装科技股份有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 针对现有开沟刀片在密植果园开沟施肥过程中存在功率消耗大、沟深稳定性差的问题, 运用旋耕理论和试验分析的方法, 设计了一种正弦指数曲线型开沟刀片。通过分析拖拉机前进速度、刀盘转速以及二者相互作用对功率消耗和沟深稳定性的影响, 确定了正弦指数曲线型开沟刀片工作参数的最佳组合为: 拖拉机前进速度 1 m/s, 刀盘转速为 200 r/min。以正弦指数曲线型开沟刀片 *B* 处弯曲角、弯曲半径、*C* 处弯曲角为影响因子, 以功率消耗和沟深稳定性为响应值, 通过三因素四水平正交试验, 确定了正弦指数曲线型开沟刀片结构参数的最佳组合为: *B* 处弯曲角为 95°, *C* 处弯曲角为 140°, 弯曲半径为 9 mm。对正弦指数曲线型开沟刀片和现有开沟刀片进行对比试验, 结果表明: 在工作参数和开沟深度相同的条件下, 正弦指数曲线型开沟刀片比现有开沟刀片功率消耗下降 3.29 kW, 沟深稳定性提高 8.83 个百分点, 各项技术指标均达到了国家相关标准的技术要求。

**关键词:** 密植果园; 圆盘式开沟机; 开沟刀片; 正弦指数曲线

**中图分类号:** S222.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1298(2017)02-0068-07

## Design and Experiment of Ditching Blade Installed in Close Planting Orchard Ditching Machinery

KANG Jianming<sup>1,2</sup> LI Shujun<sup>3</sup> YANG Xuejun<sup>1,4</sup> LIU Lijing<sup>1,4</sup> WANG Changwei<sup>4</sup> LIU Xiaoqiu<sup>4</sup>

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

2. Mechanical Equipment Research Institute, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832000, China

3. China Machine Industry Corporation Co., Ltd., Beijing 100080, China

4. Modern Agricultural Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China)

**Abstract:** Ditching fertilization is one of the important links of fruit planting, which is done artificially with large labor intensity but low efficiency, failing to satisfy the requirement of high quality fertilization for modern orchard. The disc-type ditcher is a kind of continuous earth-moving machinery followed by the chain ditcher, which is characterized by high efficiency and convenient operation, and widely used in the farmland water construction and orchard ditching fertilization, etc. But the existing ditching blade has the problems of large power consumption and poor stability of ditch depth. A sine-exponential curve ditching blade was designed through analyzing the advantages and disadvantages of existing blade, using the rotary tillage theory and experimental analysis. Through the analysis of tractor forward speed, rotating speed of the cutter, as well as the influence of their interaction on power consumption and ditch depth stability, the optimal working parameters of the sine-exponential curve ditching blade were as following: tractor forward speed was 1 m/s, rotating speed of cutter was 200 r/min. The optimal structure parameters of the sine-exponential curve ditching blade were determined through the three-factor four-level orthogonal test with bending angle and bending radius in *B* and bending angle in *C* of the sine-exponential curve ditching blade as impact factors, and power consumption and groove depth stability as response value: bending angle in *B* was 95°, bending angle in *C* was 140°, and bending radius was 9 mm. Through comparing the sine-exponential curve ditching blade with existing blade, it was showed that under the same working parameters and ditching depth, the power consumption of the sine-exponential curve ditching blade was

收稿日期: 2016-06-15 修回日期: 2016-07-26

基金项目: 国家国际科技合作专项(2013DFA71130)和北京市科技计划项目(D151100003715003)

作者简介: 康建明(1984—),男,博士生,新疆农垦科学院助理研究员,主要从事农业机械装备研究,E-mail: kjm531@sina.com

通信作者: 李树君(1962—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械装备及关键技术研究,E-mail: lisj@caams.org.cn

decreased by 3.29 kW and ditching depth stability was increased by 8.83 percentage points compared with the existing blade. Index of the technical specifications for the sine-exponential curve type ditching blade is higher than the national standard. The research results provided a theoretical basis for the sine-exponential curve type furrowing blade optimization design.

**Key words:** close planting orchard; disk ditching machinery; ditching blade; sine-exponential curve

## 引言

圆盘式开沟机是在链式开沟机之后兴起的一种连续挖土机械,具有工作效率高、操作方便等优点,已广泛应用于农田水利建设和密植果园开沟施肥等领域<sup>[1-2]</sup>。开沟刀片是圆盘式开沟机最主要的工作部件,其性能的优劣直接影响整机的可靠性和作业效果<sup>[3-4]</sup>。目前,开沟刀片主要有3种类型<sup>[5-9]</sup>:凿形刀,前端刃口较窄,呈平头或尖头形,主要起挖掘土壤作用,有较好的入土性能,开沟深度一般小于20 cm,功耗较小,但作业时容易缠草,主要用于沙土、多石砾地;弯刀,由正切部和侧切部组成,刃口为曲线,有较好的滑切性能,作业时,刀刃按与刀轴中心的距离先近后远依次入土,有利于将杂草、茎秆沿刃口甩出,常用于地面有秸秆和绿肥的黏重土壤稻田;直角刀,由正切部和侧切部两部分组成,两部分夹角大于(等于)90°,有较为锐利的刃口,刀身较宽,刚度好,有较好的砍切能力。

弯刀和直角刀是最常用的开沟刀片,但现有刀片结构仅适应于开挖小于25 cm深的沟渠,在开深沟时(大于25 cm)存在功率消耗大、开沟深度不稳定等问题,不能满足现代农业节能减阻及果园施肥农艺的要求。本文在现有弯刀结构的基础上,运用旋耕理论和试验分析的方法,通过对刀片厚度、折弯角度、弯曲半径、自磨刃进行设计和试验,寻求最佳的结构和工作参数,旨在设计一种正弦指数曲线型开沟刀片,降低开沟作业的功率消耗,提高开沟质量。

## 1 正弦指数曲线型开沟刀片工作原理与结构特点

正弦指数曲线型开沟刀片由侧切面(刃)、正切面(刃)、过渡面(刃)和抛土板组成,结构如图1所示。其中侧切刃采用正弦指数型曲线,实现切土、推土的功能。正切刃为圆弧曲线,实现切土、升土功能。过渡刃为连接侧切刃和正切刃的空间曲线,以改善刀片综合作业质量,开沟刀片在刀盘上的安装位置如图2所示。工作时,侧切刃首先与土壤发生接触,切开土壤或根草,侧切刃曲线的优劣直接影响开沟功率消耗和开沟质量。

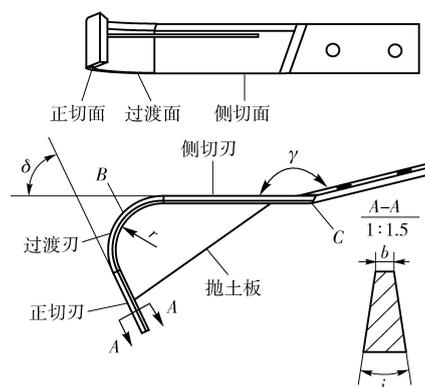


图1 正弦指数曲线型开沟刀片结构简图

Fig. 1 Structural sketch of sine-exponential curve furrowing blade

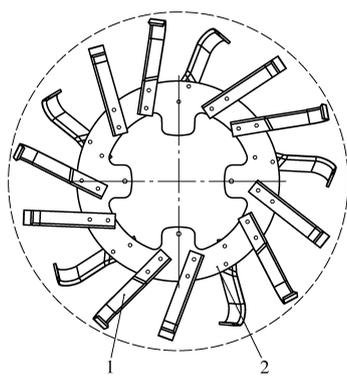


图2 开沟刀盘和开沟刀装配示意图

Fig. 2 Assembly diagram of ditching disc and blade

1. 开沟刀片 2. 开沟刀盘

由于材料和加工工艺的限制,刀片上最先触土的刃角容易磨损成圆弧,影响刀片对土壤的切削性能,正弦指数曲线型开沟刀片B、C两处的折弯增强了整体结构的稳定性,保证了刃线与土壤接触的夹角,使刀片的整段刃线始终参与工作,避免了圆弧的出现,同时刀片的刃口设计成自磨刃,以保持刀片良好的切土性能。通过对凿形刀的分析可知<sup>[10]</sup>,增大刀片的转动惯量有利于提高刀片土壤切削能力,正弦指数曲线型开沟刀片在侧切面和正切面间增设了抛土板,不仅可使切削后的土粒更易向沟外抛洒,同时可使刀片的质心外移,增加刀片旋转时的转动惯量,提高刀片对土壤的切削能力和旋转时的稳定性。

## 2 主要参数设计

### 2.1 侧切刃

侧切刃在工作时首先与土壤发生接触,产生切

削行为,侧切刃采用正弦指数曲线,此部分的滑切角随着回转半径的增大而逐渐增加,可减少摩擦阻力,降低开沟功耗<sup>[11]</sup>。侧切刃滑切角变化如图3所示。

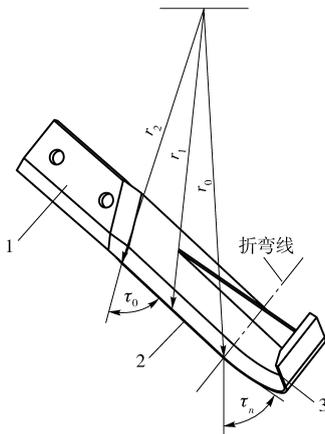


图3 侧切刃滑切角示意图

Fig. 3 Diagram of sliding cut angle on side cutting blade

1. 刀柄 2. 侧切刃 3. 正切刃

正弦指数曲线方程

$$r = r_0 \left( \frac{\sin(\tau_0 + K\theta)}{\sin\tau_0} \right)^{\frac{1}{K}} \quad (1)$$

式中  $K$ ——切土角增量与极角的比例系数

$\theta$ ——极角, ( $^\circ$ )

$r$ ——极径, mm

$\tau_0$ ——侧切刃初始滑切角, ( $^\circ$ )

$r_0$ ——初始极径, mm

选择不同的  $\tau_0$  和  $K$  值可以得到不同的正弦指数曲线,依据文献[8-9],当  $\tau_0$  取  $65^\circ \sim 70^\circ$ ,  $K$  取  $-0.3 \sim -0.1$  时,侧切刃在潮湿黏土中不缠草,但前期预试验发现,在保证开沟质量的条件下,  $\tau_0$  和  $K$  取较大值比取较小值时功率消耗大,故确定  $\tau_0 = 65^\circ$ ,  $K = -0.1$ 。根据 GB/T 5669—2008《旋耕机械刀和刀座》的设计要求,确定  $r_0 = 550$  mm。初始极径等于刀根点极径,取刀根点极径等于刀盘旋转中心距离地表的高度,本设计中刀盘旋转中心距离地表的高度为 650 mm,根据农艺要求:刀具回转半径 550 mm,切土节距 80 mm,将设计参数代入式(1),经计算,取  $r_1 = 450$  mm,  $r_2 = 350$  mm。

## 2.2 刀片厚度

由于正弦指数曲线型开沟刀片应用于较深的开沟作业中,故要求刀片应具有较高的强度以防止刀片在工作过程中产生变形。参考现有开沟刀片厚度,本次设计确定正弦指数曲线型刀片厚度为 6、8、10 mm。不同的刀片厚度会影响刀片的质量、质心位置(质心与安装轴心的距离)和变形量,应用 SolidWorks 软件有限元模块对刀片进行仿真分析<sup>[12]</sup>,仿真结果如表 1 所示。

表 1 不同厚度刀片主要参数

Tab. 1 Major parameters of blades with different thicknesses

厚度/mm	质量/kg	质心位置/mm	变形量/mm
6	1.345	158.14	0.71
8	1.452	157.93	0.43
10	1.563	159.21	0.12

由表 1 可知,刀片厚度对刀片质心的影响较小,随着刀片厚度的增加,刀片质量增大、变形量减小。为了增大刀片的转动惯量,同时防止刀片变形、保证较高的安全系数,确定刀片厚度为 10 mm。此时,刀片的最大变形量为 0.12 mm。

## 2.3 刀片 B 处弯曲角

侧切刃曲线上各点滑切角逐渐增大,对土堡有一定的加速作用。为提高刀片的切土性能,同时减小开沟阻力,降低作业功耗,  $B$  处的弯曲角应取较小值(图 1),但弯曲角过小,作业时刀尖首先接触土壤,刀片受力急剧增加,使用寿命降低,故刀片  $B$  处弯曲角  $\delta$  设计范围为  $90^\circ \sim 105^\circ$ ,通过试验确定其最优取值。

## 2.4 刀片 C 处弯曲角

为克服现有弯刀易出现磨损圆角和刃线过短的优点,正弦指数曲线型开沟刀片增加了  $C$  处弯曲角,通过改变其大小控制侧切刃线与地面的夹角,达到降低磨损、增加刃线长度的目的。通过分析凿形刀、弯刀和直角刀侧切刃线与地面的夹角可知,若  $C$  处弯折角增大,则开沟阻力增大,碎土作用减小;若  $C$  处弯曲角过小,则刀易缠绕根系,降低作业质量。本次设计取刀片  $C$  处弯曲角  $\gamma$  为  $120^\circ \sim 180^\circ$ 。

## 2.5 刀片正切面夹角

刀片正切面刃角  $i$  越小,开沟刀片越锋利,功率消耗越小<sup>[13-14]</sup>;但若  $i$  过小,则刀片使用寿命降低。根据农业机械设计手册及开沟作业要求,确定  $i = 12^\circ$ 。

## 2.6 刀片弯曲半径

刀片弯曲半径过小,工作时弯折圆弧处比较容易粘土,会降低开沟刀片在弯曲处的强度,缩短使用寿命;弯曲半径过大,会使作业后沟底的不平度增大,功率消耗随之增大。本次设计取刀片弯曲半径  $r$  为 5~17 mm。

## 2.7 刀片自磨刃

参考自磨刃犁铧的工作原理和设计参数,设计刀片的自磨刃。刀片材料选用 60Si<sub>2</sub>Mn 钢板,刀片的刃口角度取  $30^\circ$ ,并进行 0.5 mm 的中频淬火,使刀片具有自磨刃的效果。刀片热处理后表面硬度为 48~56 HRC,可保证刀片具有足够的耐磨性;芯部

热处理后硬度为 33 ~ 40 HRC, 可获得足够的刚度, 开沟时不易变形。

### 3 试验

#### 3.1 试验设备与条件

试验在北京市延庆区农机推广站试验田进行, 试验设备包括东方红 554 型拖拉机、1KF-50 型密植果园开沟施肥机、AKC-205B 型扭矩传感器和 DT2236B 型转速测试仪、数据采集卡、数据处理终端等。

根据 JB/T 11908—2014 《农用圆盘开沟机》的要求, 试验地长度 200 m, 宽度 50 m, 土壤深度 5 cm 处含水率为 8.7%, 坚实度为 1.73 MPa, 土壤深度 25 cm 处含水率为 9.4%, 坚实度为 2.06 MPa, 土壤深度 45 cm 处含水率为 9.8%, 坚实度为 2.85 MPa。

#### 3.2 刀片工作参数试验

试验以功率消耗  $P$  和沟深稳定性  $S$  为试验指标, 考察拖拉机前进速度  $v$  和刀片转速  $n$  以及二者交互作用对试验指标的影响。试验因素水平见表 2, 由于拖拉机前进速度和输出轴转速随挡位和油门开度大小发生变化, 田间试验时前进速度和刀片转速的取值以接近于表 2 中数值为准。每组试验均选用 5 种不同的正弦指数曲线型开沟刀片 (试验前期已设计出 15 种不同结构参数的正弦指数曲线型开沟刀片<sup>[15]</sup>), 试验结果取平均值。试验方案及结果见表 3。

表 2 试验因素水平

Tab. 2 Experiment factors and levels

水平	因素	
	前进速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	刀片转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$
1	0.5	180
2	1.0	200
3	1.5	220

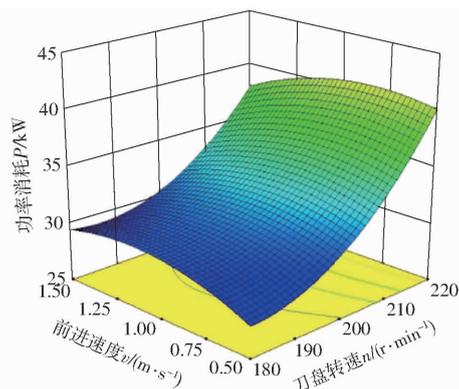
表 3 试验方案与结果

Tab. 3 Experiment scheme and results

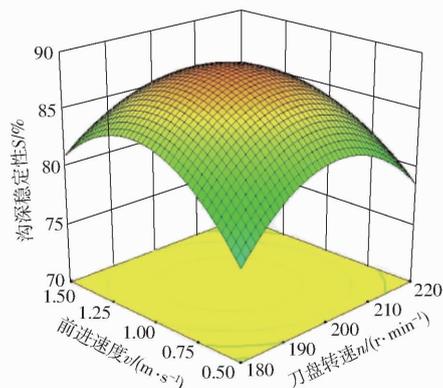
试验编号	前进速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	刀片转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	功率消耗 $P/kW$	沟深稳定性 $S/\%$
1	0.52	185	29.7	78.5
2	0.49	197	30.5	80.2
3	0.51	218	31.8	84.5
4	1.13	188	32.0	86.5
5	0.91	206	32.4	88.7
6	1.12	224	33.6	82.4
7	1.52	181	34.1	81.7
8	1.61	207	34.8	78.6
9	1.47	225	35.4	73.5

由表 3 可知, 功率消耗随拖拉机前进速度和刀片转速的升高而增大, 这是因为拖拉机前进速度和刀片转速越大, 单位时间内土壤切削量和抛送量越大, 功率消耗会相应的升高。沟深稳定性随拖拉机前进速度的升高先增大后减小, 这是因为前进速度和刀片转速较低时, 土壤不容易被抛出沟外, 存留于沟底, 当前进速度和刀片转速较高时, 由于被刀片切削分离的土壤量大于被抛出沟外的土壤, 未抛出沟外的土壤仍会残留于沟底, 沟深稳定性降低。

应用 Origin 软件分析拖拉机前进速度  $v$  与刀片转速  $n$  二者的交互作用对功率消耗  $P$  和沟深稳定性  $S$  的影响规律, 拟合响应曲面, 结果如图 4 所示。



(a) 前进速度和刀片转速对功率消耗的影响



(b) 前进速度和刀片转速对沟深稳定性的影响

图 4 交互作用影响曲面

Fig. 4 Surface figures of factors interaction effect

由图 4 可知, 随着拖拉机前进速度和刀片转速的升高, 功率消耗呈上升趋势, 沟深稳定性呈先升高后降低的趋势。为了满足标准规定的圆盘式开沟机沟深稳定性大于 85% 的要求, 同时兼顾整机的工作效率, 确定拖拉机前进速度为 1 m/s, 刀片转速为 200 r/min。

#### 3.3 刀片结构参数试验

为了考察正弦指数曲线型开沟刀片  $B$  处弯曲角  $\delta$ 、弯曲半径  $r$  和  $C$  处弯曲角  $\gamma$  对功率消耗  $P$  和沟深稳定性  $S$  的影响规律, 进行了三因素四水平正交试验, 每次试验重复 3 次取平均值, 试验时选取拖

拉机前进速度为 1 m/s,刀盘转速为 200 r/min。试验因素水平见表 4,试验方案与结果见表 5( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  为因素编码值),极差分析见表 6,方差分析见表 7。

表 4 刀片结构参数试验因素水平

Tab. 4 Test factors and levels of blade structure parameters

水平	因素		
	$B$ 处弯曲角 $\delta/(\circ)$	弯曲半径 $r/\text{mm}$	$C$ 处弯曲角 $\gamma/(\circ)$
1	90	5	120
2	95	9	140
3	100	13	160
4	105	17	180

表 5 刀片结构参数试验方案与结果

Tab. 5 Test scheme and results of blade structure parameters

试验编号	$B$ 处弯曲角 $X$	弯曲半径 $Y$	$C$ 处弯曲角 $Z$	功率消耗 $P/\text{kW}$	沟深稳定性 $S/\%$
1	1	1	1	32.5	72.5
2	1	2	2	28.8	83.2
3	1	3	3	29.4	84.7
4	1	4	4	28.7	74.2
5	2	1	2	31.2	75.4
6	2	2	1	34.5	77.5
7	2	3	4	33.7	78.8
8	2	4	3	31.5	78.5
9	3	1	3	32.5	81.2
10	3	2	4	33.6	81.4
11	3	3	1	34.8	80.2
12	3	4	2	31.4	80.5
13	4	1	4	33.8	83.0
14	4	2	3	33.6	80.4
15	4	3	2	31.5	78.5
16	4	4	1	32.9	80.5

表 6 试验结果极差分析

Tab. 6 Range analysis of test result

指标	功率消耗 $P$			沟深稳定性 $S$		
	$B$ 处弯曲角	弯曲半径	$C$ 处弯曲角	$B$ 处弯曲角	弯曲半径	$C$ 处弯曲角
$K_1$	119.4	130.0	134.7	314.6	312.1	310.7
$K_2$	130.9	130.5	122.9	310.2	322.5	317.6
$K_3$	132.3	129.4	127.0	323.3	322.2	324.8
$K_4$	131.8	124.5	129.8	322.4	313.7	317.4
$R$	12.9	6.0	11.8	13.1	10.4	14.1
最优水平	$X_3$	$Y_2$	$Z_1$	$X_3$	$Y_2$	$Z_3$
主次因素	$X > Z > Y$			$Z > X > Y$		

由表 6、7 可知,影响功率消耗的主次因素为  $B$  处弯曲角、 $C$  处弯曲角和弯曲半径,且  $B$  处弯曲角和  $C$  处弯曲角均为显著因素,最佳参数组合为  $X_3Y_2Z_1$ ,即  $B$  处弯曲角为  $100^\circ$ 、 $C$  处弯曲角为  $120^\circ$ ,弯曲半径为 9 mm。 $B$ 、 $C$  两处的弯曲角变化对功率消耗的影响

较大,这主要是因为弯曲角度的变化直接影响侧切刃和正切刃与土壤接触的先后顺序,若正切刃首先与土壤发生切削行为,因正切刃的刃口较短,土壤切削能力小于侧切面,故开沟时功率消耗也较大。

影响沟深稳定性的主次因素为  $C$  处弯曲角、 $B$  处弯曲角和弯曲半径,且  $B$  处弯曲角和  $C$  处弯曲角均为显著因素,最佳参数组合为  $X_3Y_2Z_3$ ,即  $C$  处弯曲角为  $160^\circ$ 、 $B$  处弯曲角为  $100^\circ$ ,弯曲半径为 9 mm。 $B$ 、 $C$  两处的弯曲角变化对沟深稳定性的影响较大,这主要是因为折弯角的变化直接影响开沟刀片与土壤的接触面积。过渡面和正切面与土壤的接触面积均小于侧切面与土壤的接触面积,在刀盘转速和前进速度一定时,开沟刀片与土壤接触面积越小,土壤越不易抛出沟外,导致沟底覆土不均匀,影响沟深稳定性。

为兼顾二者得失,采用综合加权评分法<sup>[16-19]</sup>,以选出使各项指标都尽可能达到最优的组合,考虑到 3 因素对衡量指标的重要程度,以 100 分作为总权值,功率消耗为 50 分,沟深稳定性为 50 分,每组试验综合评分指标为

$$y_i = \sum_{j=1}^r W_j \frac{y_{ij}}{R_j} = \sum_{j=1}^r \lambda_j y_{ij}$$

式中  $y_i$ ——第  $i$  试验所得计算值

$W_j$ ——第  $j$  个指标权值

$y_{ij}$ ——第  $i$  试验中第  $j$  个指标

$R_j$ ——第  $j$  个指标在试验中造成的极差

$\lambda_j$ ——第  $j$  个指标的计算系数

经计算,综合评分得出在功率消耗最小且沟深稳定性最优的条件下,各因素的最优水平及主次顺序为  $X_2Y_2Z_2$ ,即  $B$  处弯曲角为  $95^\circ$ 、 $C$  处弯曲角为  $140^\circ$ ,弯曲半径为 9 mm。

表 7 方差分析

Tab. 7 Analysis of variance

试验指标	方差来源	偏差平方和	自由度	均方和	$F$	显著性水平 $p$
功率消耗	$X$	28.97	1	15.20	18.24	0.006 5**
	$Y$	3.77	1	0.97	1.58	0.062 0
	$Z$	31.24	1	11.26	16.51	0.008 3**
	误差	9.27	3	1.27		
	总和	73.25	6			
沟深稳定性	$X$	47.63	1	25.24	36.08	0.005 2**
	$Y$	4.21	1	1.48	2.39	0.081 0
	$Z$	49.24	1	20.50	38.24	0.004 7**
	误差	8.65	3	6.24		
	总和	109.73	6			

注:\*\*表示差异极显著( $p < 0.01$ )。

### 3.4 整机作业效果试验

通过正弦指数曲线型开沟刀片工作参数和结构

参数的试验分析,确定了最优的刀片工作参数和结构参数组合,即拖拉机前进速度为 $1.0\text{ m/s}$ ,刀盘转速为 $200\text{ r/min}$ ,刀片 $B$ 处弯曲角为 $95^\circ$ , $C$ 处弯曲角为 $140^\circ$ ,弯曲半径为 $9\text{ mm}$ (图5a)。将以上参数的正弦指数曲线型开沟刀片与普通开沟刀片(GB/T 5669—2008,弯刀IT245,弯折角 $60^\circ$ ,弯曲半径 $30\text{ mm}$ ,正切刃滑切角 $43^\circ$ )安装在同一开沟机上依次进行对比试验(图5b)。



(a) 正弦指数曲线型刀片 (b) 整机作业效果

图5 正弦指数曲线型刀片实物与整机作业效果

Fig. 5 Photos of blades and machine operation effect

试验时,设定试验测区长 $40\text{ m}$ ,两端各截取 $10\text{ m}$ 准备区,中间 $20\text{ m}$ 为数据采集区<sup>[20-21]</sup>,每隔 $2\text{ m}$ 选取1个测试点,通过AKC-205B型扭矩传感器和DT2236B型转速测试仪记录该点的扭矩值和转速值,通过刻度尺测量该点的开沟深度,测量结果如表8所示。

表8 田间测试结果对比

Tab. 8 Comparison of field test results

测试点	扭矩 $M/(\text{N}\cdot\text{m})$		功耗 $P/\text{kW}$		沟深 $h/\text{cm}$	
	设计	普通	设计	普通	设计	普通
	刀片	刀片	刀片	刀片	刀片	刀片
1	1 562.04	1 638.29	35.98	37.74	43	52
2	1 573.52	1 582.48	36.25	36.46	39	42
3	1 484.26	1 720.44	36.50	39.63	42	34
4	1 569.72	1 694.82	36.16	39.04	47	35
5	1 438.29	1 777.23	33.13	40.94	35	28
6	1 528.14	1 586.76	35.20	36.55	34	38
7	1 427.48	1 688.47	32.88	38.90	42	35
8	1 428.46	1 724.20	32.91	39.72	40	30
9	1 684.61	1 813.04	38.81	41.77	35	29
10	1 829.83	1 728.21	42.15	39.81	39	37

由表8可知,在测试区域内,安装正弦指数曲线型开沟刀片的开沟机功率消耗平均值为 $35.77\text{ kW}$ ,沟深稳定性为 $90.16\%$ ;安装普通开沟刀片的开沟机功率消耗平均值为 $39.06\text{ kW}$ ,沟深稳定性为 $81.33\%$ ,正弦指数曲线型开沟刀片功率消耗比普通开沟刀片降低 $3.29\text{ kW}$ ,沟深稳定性提高 $8.83$ 个百分点,各项性能指标均超过国家相关标准的技术要求。

## 4 结论

(1)设计了一种与密植果园开沟施肥配套使用的正弦指数曲线型开沟刀片,其结构有利于降低开沟功率消耗,提高沟深稳定性。

(2)正弦指数曲线型开沟刀片工作参数试验结果表明,拖拉机前进速度和刀盘转速对功率消耗和沟深稳定性均有显著影响,当前进速度为 $1\text{ m/s}$ 、刀盘转速为 $200\text{ r/min}$ 时,功率消耗和沟深稳定性有最优值。正弦指数曲线型开沟刀片结构参数试验结果表明,刀片 $B$ 处弯曲角和 $C$ 处弯曲角对功率消耗和沟深稳定性均有显著影响,对功率消耗影响的主次因素排序及其较优水平为 $B$ 处弯曲角 $100^\circ$ 、 $C$ 处弯曲角 $120^\circ$ 、弯曲半径 $9\text{ mm}$ ,对沟深稳定性影响的主次因素排序及其较优水平为 $C$ 处弯曲角 $160^\circ$ 、 $B$ 处弯曲角 $100^\circ$ 、弯曲半径 $9\text{ mm}$ 。通过加权综合评分法得出,在功率消耗最小且沟深稳定性最优的条件下,各因素的主次顺序及最优水平为 $B$ 处弯曲角 $95^\circ$ 、 $C$ 处弯曲角 $140^\circ$ 、弯曲半径 $9\text{ mm}$ 。

(3)对安装有正弦指数曲线型开沟刀片的密植果园开沟施肥机进行田间作业效果试验,结果表明,正弦指数曲线型开沟刀片的功率消耗平均值为 $35.77\text{ kW}$ ,沟深稳定性为 $90.16\%$ ;普通开沟刀片的功率消耗平均值为 $39.06\text{ kW}$ ,沟深稳定性为 $81.33\%$ ,正弦指数曲线型开沟刀片功率消耗比普通开沟刀片降低 $3.29\text{ kW}$ ,沟深稳定性提高 $8.83$ 个百分点,各项性能指标均超过国家相关标准的技术要求。

## 参 考 文 献

- 姚克恒,刘世豪,夏拥军,等.开沟机作业功耗的正交试验分析及其优化设计[J].排灌机械工程学报,2011,29(6):529-535.  
YAO Keheng, LIU Shihao, XIA Yongjun, et al. Orthogonal experiment analysis and optimization design for operation power of ditcher[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(6): 529-535. (in Chinese)
- 张佩,万倬臣.1K-500自走式果园施肥开沟管理机的研制[J].农业装备技术,2014,43(2):25-26.  
ZHANG Pei, WAN Fengchen. Research and manufacture of 1K-500 orchard fertilization management of furrowing machine[J]. Agricultural Equipment & Technology, 2014, 43(2): 25-26. (in Chinese)
- 彭嵩植,曲国良.旋耕弯刀C处弯曲角能耗理论分析及降低能耗的途径[J].南京农业大学学报,1991,14(1):94-99.  
PENG Songzhi, QU Guoliang. Calculation and theoretical analysis on energy consumption of rotary blades[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1991, 14(1): 94-99. (in Chinese)
- 曲国良,丁为民,彭嵩植.旋耕弯刀侧切刃曲线分析及新型曲线的推导[J].农业机械学报,1991,22(2):22-27.

- QU Guoliang, DING Weimin, PENG Songzhi. Analysis on edge-curves of rotary blades and derivation of new edge-curves [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1991, 22(2): 22-27. (in Chinese)
- 5 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.
- 6 梁方. 草地切根施肥播复式改良机械的优化设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- LIANG Fang. Optimization design and experiment study on root-cutter with fertilization and reseeding compound remediation machine for grassland[D]. Beijing, China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 7 贾洪雷, 汲文峰, 韩伟峰, 等. 旋耕-破茬通用刀片结构参数优化试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 45-50.
- JIA Honglei, JI Wenfeng, HAN Weifeng, et al. Optimization experiment of structure parameters of tilling and stubble breaking universal blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 45-50. (in Chinese)
- 8 彭嵩植, 吴德光. 旋耕机工作部件设计方法的研究(一)[J]. 镇江农业机械学院学报, 1982(3): 5-26.
- 9 彭嵩植, 吴德光. 旋耕机工作部件设计方法的研究(二)[J]. 江苏农学院学报, 1983(1): 41-55.
- 10 贾洪雷, 姜鑫铭, 郭明卓, 等. V-L型秸秆粉碎还田刀片设计与试验[J/OL]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 28-33. [http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150104&journal\\_id=nygxcb=1](http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150104&journal_id=nygxcb=1). DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2015.01.004.
- JIA Honglei, JIANG Xinming, GUO Mingzhuo, et al. Design and experiment of V-L shaped smashed straw blade[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 28-33. (in Chinese)
- 11 王金武, 王奇, 唐汉, 等. 水稻秸秆深埋整秆还田装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 112-117. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150916&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150916&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.016.
- WANG Jinwu, WANG Qi, TANG Han, et al. Design and experiment of rice straw deep buried and whole straw returning device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 112-117. (in Chinese)
- 12 张居敏, 周勇, 夏俊芳, 等. 旋耕埋草机螺旋刀刀的数学建模与参数分析[J/OL]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 18-25. [http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130103&journal\\_id=nygxcb=1](http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130103&journal_id=nygxcb=1). DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2013.01.003.
- ZHANG Jumin, ZHOU Yong, XIA Junfang, et al. Mathematical modeling and analysis of helical blade for stubble burying rotary tiller[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 18-25. (in Chinese)
- 13 马洪亮, 高焕文, 魏淑艳. 斜置驱动缺口圆盘刀功耗模型的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 150-153.
- MA Hongliang, GAO Huanwen, WEI Shuyan. Experimental study on power mathematical model of the oblique driven tooth-disk [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 150-153. (in Chinese)
- 14 汲文峰, 贾洪雷, 佟金. 旋耕-破茬仿生刀片田间作业性能的试验研究[J/OL]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 24-30. [http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20121205&journal\\_id=nygxcb=1](http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121205&journal_id=nygxcb=1). DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2012.12.005.
- Ji Wenfeng, JIA Honglei, TONG Jin. Experiment on working performance of bionic blade for soil-rototilling and stubble-breaking [J/OL]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12): 24-30. (in Chinese)
- 15 康建明, 李树君, 杨学军, 等. 正弦指数曲线型开沟刀片参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 91-99. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161112&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161112&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.012.
- KANG Jianming, LI Shunjun, YANG Xuejun, et al. Structure parameters optimization of sine exponential curve type ditching blade [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 91-99. (in Chinese)
- 16 刘琼峰, 李明德, 段建南, 等. 农田土壤铅、镉含量影响因素地理加权回归模型分析[J/OL]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 225-234. [http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130330&journal\\_id=nygxcb=1](http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130330&journal_id=nygxcb=1). DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2013.03.030.
- LIU Qiongfeng, LI Mingde, DUAN Jiannan, et al. Analysis on influence factors of soil Pb and Cd in agricultural soil of Changsha suburb based on geographically weighted regression model[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 225-234. (in Chinese)
- 17 鲁恒, 付萧, 贺一楠, 等. 基于迁移学习的无人机影像耕地信息提取方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 274-279. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20151237&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151237&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.037.
- LU Heng, FU Xiao, HE Yi'nan, et al. Cultivated land information extraction from high resolution UAV images based on transfer learning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 274-279. (in Chinese)
- 18 朱忠祥, 韩科立, 宋正河, 等. 基于置信度加权的拖拉机组合导航融合定位方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1): 210-215.
- ZHU Zhongxiang, HAN Keli, SONG Zhenghe, et al. Fusion positioning method on weight-confidence for tractor integrated navigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.1): 210-215. (in Chinese)
- 19 田素博, 杨继峰, 王瑞丽, 等. 蔬菜嫁接机嫁接夹振动排序装置工作参数优化试验[J/OL]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 9-16. [http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140602&journal\\_id=nygxcb=1](http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140602&journal_id=nygxcb=1). DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.06.002.
- TIAN Subo, YANG Jifeng, WANG Ruili, et al. Optimization experiment of operating parameters on vibration sorting clip device for vegetable grafting machine[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(6): 9-16. (in Chinese)
- 20 张青松, 廖庆喜, 汲文峰, 等. 油菜直播机开沟犁体曲面优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 53-59. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150108&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150108&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.008.
- ZHANG Qingsong, LIAO Qingxi, JI Wenfeng, et al. Surface optimization and experiment on ditch plow of direct rapeseed seeder [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 53-59. (in Chinese)
- 21 张秀梅, 张居敏, 夏俊芳, 等. 水旱两用秸秆还田耕整机关键部件设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 10-16.
- ZHANG Xiumei, ZHANG Jumin, XIA Junfang, et al. Design and experiment on critical component of cultivator for straw returning in paddy field and dry land[J]. Transactions of the CASE, 2015, 31(11): 10-16. (in Chinese)