

# 正弦指数曲线型开沟刀片结构参数优化

康建明<sup>1,2</sup> 李树君<sup>1</sup> 杨学军<sup>1,3</sup> 刘立晶<sup>3,4</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. 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128; 4. 现代农装科技股份有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 为获取正弦指数曲线型开沟刀片的最佳结构参数, 依据正弦指数曲线方程和二次正交旋转中心组合设计方案, 设计了 15 种型式的开沟刀片, 并进行土槽试验。以弯折角、弯曲半径、切土角为影响因子, 以功率消耗和沟深稳定性系数为响应值, 利用 Design-Expert 8.0.6 软件进行回归分析和响应面分析, 探求单因子及交互因子对响应值的影响效应, 并结合非线性优化计算方法, 对正弦指数曲线型开沟刀片的结构参数进行优化计算。结果表明: 在土壤坚实度为 0.29 MPa、土壤含水率 16.2% 的条件下, 各因子对功率消耗的影响贡献由大到小为: 弯折角、切土角、弯曲半径; 对沟深稳定性系数的影响贡献由大到小为: 切土角、弯折角、弯曲半径。优化所得正弦指数曲线型开沟刀片最佳结构参数: 弯折角为 86.75°, 弯曲半径为 12 mm, 切土角为 13.8°, 此时功率消耗理论最小值为 32.32 kW, 沟深稳定性系数为 95.6%, 验证试验表明功率消耗最小值为 34.27 kW, 沟深稳定性系数为 92.82%, 理论值与试验值误差小于 10%, 验证了回归模型的正确性。将优化前、后和现有开沟刀片在 2 种不同土壤条件下进行对比试验, 结果表明优化后刀片的功率消耗比优化前分别下降 4.28 kW 和 4.23 kW, 沟深稳定性系数分别提高 7.12 个百分点和 7.02 个百分点, 比现有开沟刀片下降 7.68 kW 和 6.91 kW, 沟深稳定性系数提高 14.34 个百分点和 8.34 个百分点。研究成果为正弦指数曲线型开沟刀片的优化设计提供了理论参考。

**关键词:** 开沟刀片; 正弦指数曲线; 土槽试验; 参数优化

中图分类号: S222.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)11-0091-09

## Structure Parameters Optimization of Sine Exponential Curve Type Ditching Blade

Kang Jianming<sup>1,2</sup> Li Shujun<sup>1</sup> Yang Xuejun<sup>1,3</sup> Liu Lijing<sup>3,4</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. Collaborative Innovation Center for Southern Grain and Oil Crop, Changsha 410128, China

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

**Abstract:** In order to obtain the optimum structure parameters of sine exponential curve type trenching blade, according to the equation of sine exponential curve, totally 15 types of furrowing blade were designed and test in soil bin was conducted. A central composite design method of the second order regression orthogonal was carried out with bending angle, bending radius and sliding cutting angle as experiment factors and with power consumption and stability of groove depth as response values. By using Design-Expert 8.0.6 regression analysis method and regression surface method, both single factor and interactive factor on response values were analyzed. Combined with nonlinear optimization calculation method, the structural parameters were calculated optimally. The results obtained under the conditions of soil strength was 0.29 MPa, moisture content was 16.2%, in terms of significant degree, the influence factors of power consumption were bending angle, sliding cutting angle and bending radius; the influence factors of stability of groove depth were sliding cutting angle, bending angle and bending radius. The optimum parameter condition of the sine exponential curve type trenching blade after optimizing was

收稿日期: 2016-03-31 修回日期: 2016-04-21

基金项目: 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及关键技术研究,E-mail: kjm531@sina.com

通信作者: 刘立晶(1976—),女,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: xylj@ sina.com

86.75° of bending angle, 12 mm of bending radius and 13.8° of sliding cutting angle. At this time, power consumption achieved theoretical optimum value of 32.32 kW, stability of groove depth was 95.6%. Through verification by an experiment under optimum condition, the experiment value of power consumption was 34.27 kW, stability of groove depth was 92.82%, which indicated that the experiment results and predicted results were consistent, and regression models established by the experiment were appropriate. According to comparison of trench experiment before and after parameter optimization under two different soil conditions, power consumption fell by 4.28 kW and 4.23 kW, respectively; groove depth stability were increased by 7.12 and 7.02 percentage points, respectively. According to comparison of existed trenching blade under two different soil conditions, power consumption fell by 7.68 kW and 6.91 kW, respectively; groove depth stability were increased by 14.34 and 8.34 percentage points, respectively. Research result of the article provides a theoretical basis for the sine curve type furrowing blade optimization design.

**Key words:** ditching blade; sine exponential curve; test in soil bin; parameters optimization

## 引言

圆盘式开沟机(简称开沟机)是一种连续挖土机械,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果园开沟施肥等领域<sup>[1-2]</sup>。开沟刀片是开沟机最重要的工作部件,其结构参数是否合理直接影响整机的功率消耗和开沟质量<sup>[3]</sup>。

开沟刀片按侧切刃刃口曲线的不同可分为对数螺旋型、阿基米德螺旋型、正弦指数曲线型、偏心圆弧线型,其中正弦指数曲线型开沟刀片由于加工简单、切土能耗低等优点,得到了广泛应用<sup>[4]</sup>。曲国良等<sup>[5]</sup>根据侧切刃切土角理论,建立了侧切刃微分方程曲线集合,证明正弦指数曲线更适合做侧切刃曲线;彭嵩植等<sup>[6]</sup>对  $r = 195$  mm 旋耕弯刀侧切面切土能耗进行理论计算,得出增大安装角可以改变土壤破坏形式,减小切土阻力;张居敏等<sup>[7]</sup>推导了侧切刃轮廓曲线的静态方程和动态方程,得出了动态滑切角、动态切土角随刀辊位置角的变化规律;贾洪雷等<sup>[8]</sup>以 L 型碎茬刀及宽型旋耕刀为基础,设计了 9 种旋耕-破茬通用刀片,并通过土槽试验得出了刀片最优结构参数。以上研究大多是通过理论计算得出较适宜的刀片结构参数,缺乏对刀片结构参数与作业性能的试验研究,另外目前开沟刀片大多参考旋耕刀片设计,开沟作业功率消耗大,无法满足现代农业节能降耗的要求。因此,为降低开沟作业功率消耗,提高开沟质量,本文以正弦指数曲线理论为基础,设计 15 种正弦指数曲线型开沟刀片,通过土槽试验,研究刀片结构参数对功率消耗和沟深稳定性的影响,获取最佳的结构参数,为正弦指数曲线型开沟刀片的设计提供理论基础。

## 1 初步设计

正弦指数曲线型开沟刀片由侧切面、正切面和过渡面组成。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,随后正切刃从横向切开土壤或根草。过渡刃是沿着正切刃弯折线方向将侧切刃和正切刃线连接起来的一段圆弧,如图 1 所示。

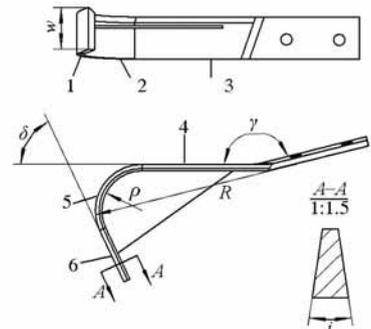


图 1 正弦指数曲线型开沟刀片结构简图

Fig. 1 Structure of sine exponential curve furrowing blade

1. 正切面 2. 过渡面 3. 侧切面 4. 侧切刃 5. 过渡刃 6. 正切刃

### 1.1 侧切刃刃口曲线方程

正弦指数曲线型开沟刀片侧切刃刃口曲线的切土性能以切土角  $\tau$  表示,切土角  $\tau$  是刃口曲线  $EF$  上一点  $A$  的矢径与过该点的切线间的夹角,如图 2

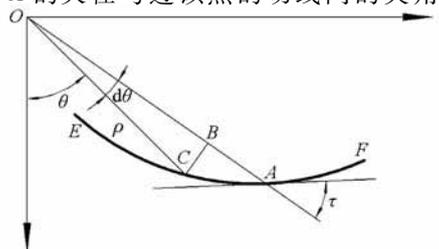


图 2 侧切刃刃口曲线定义图

Fig. 2 Definition of side cutting edge curve

所示。令  $\rho = \rho(\theta)$  为侧切刃刃口曲线的极坐标方程, 当  $\theta$  增加  $d\theta$  时, 极径的增量为  $d\rho$ 。则

$$\begin{aligned} \tan \angle BAC &= \frac{l_{BC}}{l_{AB}} = \frac{\rho \sin d\theta}{\rho + d\rho - \rho \cos d\theta} = \\ &= \frac{\rho \sin d\theta}{d\rho + \rho(1 - \cos d\theta)} = \frac{\rho \sin d\theta}{d\rho + \rho \sin \frac{d\theta}{2}} \\ &= \frac{\frac{\rho \sin \theta}{d\theta}}{\frac{d\rho}{d\theta} + \rho \sin \frac{d\theta}{2} \frac{\sin \frac{d\theta}{2}}{\frac{d\theta}{2}}} \end{aligned} \quad (1)$$

若  $d\theta$  趋近于零, 则  $C$  点趋近于  $A$  点,  $\angle BAC$  趋近于  $\tau$ , 则

$$\lim_{\angle BAC \rightarrow \tau} \tan \angle BAC = \lim_{d\theta \rightarrow 0} \frac{\frac{\rho \sin \theta}{d\theta}}{\frac{d\rho}{d\theta} + \rho \sin \frac{d\theta}{2} \frac{\sin \frac{d\theta}{2}}{\frac{d\theta}{2}}} = \frac{\rho}{\frac{d\rho}{d\theta}}$$

$$\text{即} \quad \tan \angle BAC = \tan \tau = \frac{\rho}{\rho'} \quad (2)$$

或  $d\rho = \rho \cot \tau d\theta$   
当切土角  $\tau$  与极角  $\theta$  成线性关系时, 即  $\tau = \tau_0 + K\theta$ , 代入式(2)得

$$\rho = \rho_0 \left( \frac{\sin(\tau_0 + K\theta)}{\sin \tau_0} \right)^{\frac{1}{K}} \quad (3)$$

式中  $K$ ——切土角增量与极角的比例系数

$\tau$ ——侧切刃滑切角, ( $^\circ$ )

$\theta$ ——极角, rad

$\rho$ ——极径, mm

$\tau_0$ ——侧切刃初始滑切角, ( $^\circ$ )

$\rho_0$ ——初始极径, mm

$\rho'$ ——极角趋近于零时, 极径增量与极角增量的比值

式(3)即为正弦指数曲线型开沟刀片侧切刃刃口曲线方程。

选择不同的  $\tau_0$  和  $K$  可以得到不同的正弦指数曲线型侧切刃刃口曲线, 依据文献[9-10], 当  $\tau_0$  取  $65^\circ \sim 70^\circ$ ,  $K$  取  $-0.06 \sim -0.1$  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, 故本设计取  $\tau_0 = 65^\circ$ ,  $K = 0.1$ , 此时正弦指数曲线型侧切刃刃口曲线如图 2 中  $EF$  所示。

## 1.2 正弦指数曲线型开沟刀片结构参数

正弦指数曲线型开沟刀片结构参数主要有:

(1) 回转半径  $R$ 。开沟作业时, 刀片回转半径, 主要根据农业生产要求的沟深进行确定, 在开沟

深度和前进速度一定的情况下, 应尽量选择较大的回转半径<sup>[11]</sup>。本设计选择  $R = 550$  mm。

(2) 弯折角  $\delta$ 。即开沟刀正切面与侧切面夹角。弯折角过小, 作业时刀尖首先接触土壤, 刀片受力急剧增加, 降低刀片的使用寿命; 弯折角过大, 开沟刀切割土垡时, 首先在弯折处接触土壤, 然后滑向侧切刃, 开沟阻力增大<sup>[12]</sup>。

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

(4) 弯曲半径  $r$ 。弯曲半径太小工作时弯折圆弧处容易粘土, 会降低开沟刀片在弯曲处的强度, 缩短使用寿命; 但是弯曲半径过大, 会使作业后沟底的不平度增大, 功率消耗也会增大。

(5) 切土角  $\gamma$ 。若切土角增大, 则开沟阻力增大, 碎土作用减小; 但若切土角过小, 则刀易缠绕根系, 降低作业质量。

通过以上分析, 回转半径  $R$  和正切面刃角  $i$  均已确定。而其余 3 个参数: 弯折角  $\delta$ 、弯曲半径  $r$  和切土角  $\gamma$  的变化会对开沟功率消耗及作业质量造成影响, 为此选取这 3 个参数作为变量, 根据二次正交旋转中心组合设计方案, 设计出 15 种正弦指数曲线型开沟刀片, 如图 3 所示。

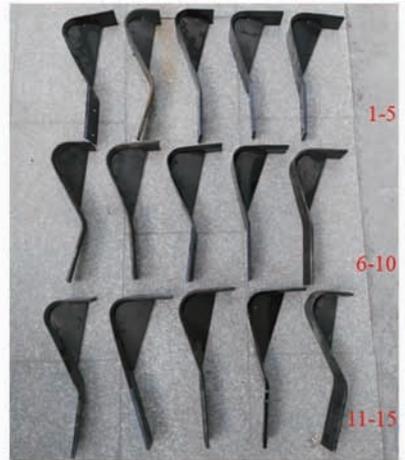


图 3 15 种正弦指数曲线型开沟刀片

Fig. 3 Fifteen types of sine exponential curve blade

## 2 结构参数试验优化

在满足开沟作业质量的前提下, 功率消耗和沟深稳定性应作为确定正弦指数曲线型开沟刀片结构参数的主要依据。本试验目的是在开沟深度 40 cm, 前进速度 1.0 km/h 的条件下, 比较不同组合的结构参数对功率消耗和沟深稳定性的影响。

### 2.1 试验设备与条件

试验于 2016 年 1 月 5—17 日在中国农业机械

化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室进行。正弦指数曲线型开沟刀片安装在课题组研制的圆盘式开沟施肥机上,试验设备包括土槽、土槽台车、扭矩传感器、转速测试仪、数据采集卡、数据处理终端等,如图4所示。土槽台车控制试验所需的前进速度,可实现0~9 km/h范围内无级调速;升降电动机控制丝杠伸缩进而调节开沟施肥机离地高度,实现对开沟深度的控制;动力输出轴转速可在0~200 r/min范围内无极调速,扭矩由AKC-205B型扭矩传感器通过TS-5HM型智能测试仪显示,并与计算机相连,将采集的数据传输到计算机,根据在刀盘转速一定时,功率与扭矩的正比关系,通过计算获得所需的功率消耗值。试验时通过人为压实土壤模拟田间环境,土壤平均坚实度调整为0.29 MPa,土壤含水率为16.2%,试验现场如图5所示。

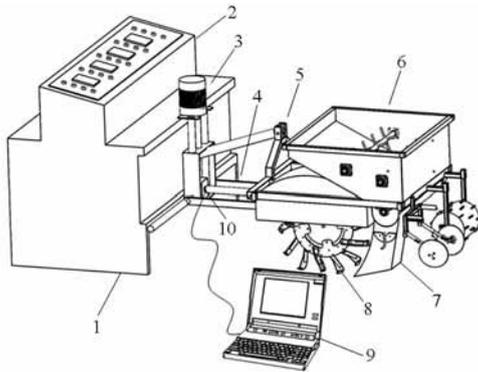


图4 开沟刀片功率消耗测试试验台结构简图

Fig. 4 Test-bed for test power consumption of ditching blade

1. 土槽台车 2. 控制面板 3. 升降电动机 4. 动力输出轴  
5. 悬挂装置 6. 肥箱 7. 肥管 8. 开沟刀片 9. 数据处理终端  
10. 传感器



图5 试验现场照片

Fig. 5 Test scene photo

## 2.2 试验因素与性能指标

### 2.2.1 试验因素

选取弯折角 $\delta$ 、弯曲半径 $r$ 和切土角 $\gamma$ 为试验因素,根据文献[9]和预试验结果,选取试验因素零水平弯折角为 $110^\circ$ ,弯曲半径10 mm,切土角为 $15^\circ$ ,依据三元二次回归正交组合设计理论<sup>[14-15]</sup>,确定试验因素水平编码如表1所示。

表1 试验因素编码

Tab. 1 Coding levels and factors

编码值	因素		
	弯折角/ $(^\circ)$	弯曲半径/mm	切土角/ $(^\circ)$
1. 353	130	15	20
1	125	14	19
0	110	10	15
-1	95	6	11
-1. 353	90	5	10

### 2.2.2 性能指标

#### (1) 功率消耗

根据理论力学原理可知,在开沟机的工作过程中,功率消耗 $P$ 与刀轴扭矩 $M$ 、转速 $n$ 之间的关系为<sup>[16-18]</sup>

$$P = \frac{nM}{9550} \quad (4)$$

式中  $P$ ——作业功耗,kW

$M$ ——刀轴扭矩,N·m

$n$ ——刀盘转速,r/min

因此,在开沟过程中只要测得动力输出轴上的扭矩和转速,乘以传递效率,即可计算出正弦指数曲线型开沟刀片在开沟过程中的功率消耗。试验借助扭矩转速测量仪和传感器组成的测试系统来测量作业过程中的扭矩和转速,实时记录功耗数据。

#### (2) 沟深稳定性

沟深稳定性是对开沟机纵向开沟稳定性的评价,体现开沟刀片开沟的均匀程度。参照文献[19],用卷尺和直尺测量各试验组开沟深度,并计算沟深稳定性系数

$$U = 1 - V \quad (5)$$

其中  $V = \frac{S}{\bar{h}} \times 100\% \quad (6)$

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2} \quad (7)$$

$$\bar{h} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i \quad (8)$$

式中  $U$ ——开沟深度稳定性系数,%

$V$ ——开沟深度变异系数,%

$S$ ——开沟深度标准差,cm

$\bar{h}$ ——开沟平均深度,cm

$h_i$ ——开沟深度实测值,cm

$N$ ——开沟区域沟深测量点数量,个

### 2.3 试验方法与数据处理

以弯折角 $\delta$ 、弯曲半径 $r$ 和切土角 $\gamma$ 作为试验因素,以功率消耗 $Y_1$ 和沟深稳定性系数 $Y_2$ 为响应值,选择进行8次二水平试验,6次星号试验和3次零水平试验,共计17组试验<sup>[20-22]</sup>,试验方案及结果如

表 2 所示,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  为因素编码值。表中编号 1 ~ 15 与图 3 中编号对应, 第 16、17 组试验与第 15 组试验所用刀型相同。

采用 Design - Expert 8. 0. 6 分析软件<sup>[23-25]</sup> 对试验数据进行分析处理。通过  $t$  检验对回归模型各因素影响的显著性进行检验, 采用非线性优化计算方法, 结合 Matlab 软件优化工具箱, 对正弦指数曲线型开沟刀片的结构参数进行优化计算, 获得符合要求的最佳参数组合。

表 2 试验方案与结果

Tab. 2 Experiment scheme and results

编号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	功率消耗 $Y_1$ /kW	沟深稳定性 系数 $Y_2$ /%
1	1	1	1	38.5	76.5
2	1	1	-1	25.6	85.2
3	1	-1	1	40.5	73.8
4	1	-1	-1	35.2	70.1
5	-1	1	1	36.5	75.4
6	-1	1	-1	42.5	63.4
7	-1	-1	1	48.7	68.9
8	-1	-1	-1	35.7	78.5
9	1.353	0	0	25.6	90.5
10	-1.353	0	0	42.8	67.5
11	0	1.353	0	25.6	85.4
12	0	-1.353	0	38.5	76.5
13	0	0	1.353	25.6	90.5
14	0	0	-1.353	46.8	76.5
15	0	0	0	38.5	78.5
16	0	0	0	34.5	81.5
17	0	0	0	25.6	88.6

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 试验结果回归分析

采用 Design - Expert 8. 0. 6 软件<sup>[23-24]</sup> 对试验数据进行统计分析, 结果如表 3 所示。

根据功率消耗  $Y_1$  统计分析可知, 在  $p < 0.05$  水平上  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_1X_3$ 、 $X_1^2$ 、 $X_2^2$  和  $X_3^2$  的系数显著, 其余不显著。总模型的  $p$  值和决定系数  $R^2$  分别为 0.000 1 和 0.960 1, 而失拟项的  $p$  值为 0.68, 说明回归模型极其显著且具有很高的拟合精度, 失拟不显著, 回归有效。同理, 对于沟深稳定性系数  $Y_2$  统计分析可知, 总模型的  $p$  值为 0.000 1, 失拟项的  $p$  值为 0.17, 回归模型显著, 失拟不显著, 且模型的决定系数为 0.846 7, 回归模型拟合精度高。将不显著项删除后得到各响应值的回归方程

$$Y_1 = 25.06 - 2.06X_1 + 0.59X_2 - 0.97X_3 - 0.5X_1X_3 + 9.49X_1^2 + 7.04X_2^2 + 4.91X_3^2$$

表 3 试验统计分析结果

Tab. 3 Results of statistical analysis for experiment

系数	功率消耗 $Y_1$			沟深稳定性系数 $Y_2$		
	数值	$F$	$p$	数值	$F$	$p$
$\beta_0$	25.06			88.04		
$\beta_1$	-2.06	20.31 **	0.008 5	-0.65	23.07 **	0.005 6
$\beta_2$	0.59	13.02 **	0.004 7	-0.26	21.25 **	0.004 4
$\beta_3$	-0.97	15.62 **	0.007 2	3.59	24.36 **	0.006 1
$\beta_{12}$	-1.48	5.24	0.058 0	3.15	4.93	0.061 8
$\beta_{13}$	-0.50	8.48 *	0.045 0	2.10	1.90	0.210 3
$\beta_{23}$	-2.10	0.64	0.072 0	1.42	0.85	0.388 5
$\beta_{11}$	9.49	24.36 **	0.006 1	-6.01	31.75 **	0.004 8
$\beta_{22}$	7.04	41.89 **	0.005 3	-6.18	4.47 *	0.025 6
$\beta_{33}$	4.91	75.19 **	0.002 7	-8.98	12.98 **	0.007 5
模型 $p$ 值	0.000 1 **	0.000 1 **				
失拟 $p$ 值	0.68	0.17				
$R^2$	0.960 1	0.846 7				

注: \* 表示差异显著 ( $p < 0.05$ ); \*\* 表示差异极显著 ( $p < 0.01$ )。

$$Y_2 = 88.04 - 0.65X_1 - 0.26X_2 + 3.59X_3 - 6.01X_1^2 - 6.18X_2^2 - 8.98X_3^2$$

#### 3.2 单因子对响应值的影响效果分析

采用降维方法分析单因子对响应值的影响效应, 根据响应值的回归方程, 将其它因子固定在零水平, 采用单因子效应方程描述该因子对响应值的影响, 单因子效应曲线如图 6 所示。

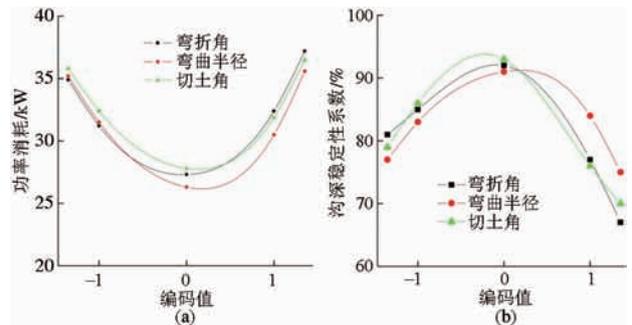


图 6 单因子效应曲线

Fig. 6 Curves of single factor effect

##### 3.2.1 单因子对功率消耗影响效应分析

由图 6a 知, 功率消耗与弯折角、弯曲半径、切土角的关系均为下凹曲线, 当各因子编码值分别小于其极值点处编码值时, 因子对功率消耗的影响呈负效应; 反之, 因子对功率消耗的影响呈正效应。当弯折角编码值为 0 (实际值为  $110^\circ$ ) 时, 功率消耗最小为 27.50 kW; 当弯曲半径编码值为 0.32 (实际值为 11.28 mm) 时, 功率消耗最小为 26.20 kW; 当切土角编码值为 0.25 (实际值为  $16^\circ$ ) 时, 功率消耗最小为 28.36 kW。

##### 3.2.2 单因子对沟深稳定性影响效应分析

由图 6b 知, 沟深稳定性系数与弯折角、弯曲半

径和切土角的关系均为上凸曲线,其极值点分别在编码值为 $-0.95$ 、 $0.42$ 和 $-0.75$ 处。当各因子编码值分别小于其极值点处编码值时,因子对沟深稳定性系数的影响呈正效应。反之,因子对沟深稳定性系数的影响呈负效应。当弯折角编码值为 $-0.95$ (实际值 $95.75^\circ$ )时,沟深稳定性系数最高为 $92.0\%$ ;弯曲半径编码值为 $0.42$ (实际值 $11.68\text{ mm}$ )

时,沟深稳定性系数最高为 $90.8\%$ ;当切土角编码值为 $-0.75$ (实际值 $12^\circ$ )时,沟深稳定性系数最高为 $94.24\%$ 。

### 3.3 交互因子对响应值的影响效果分析

弯折角、弯曲半径、切土角任意两因子作为交互因子对功率消耗、沟深稳定性系数的响应曲面及等高线图分别如图7、8所示。

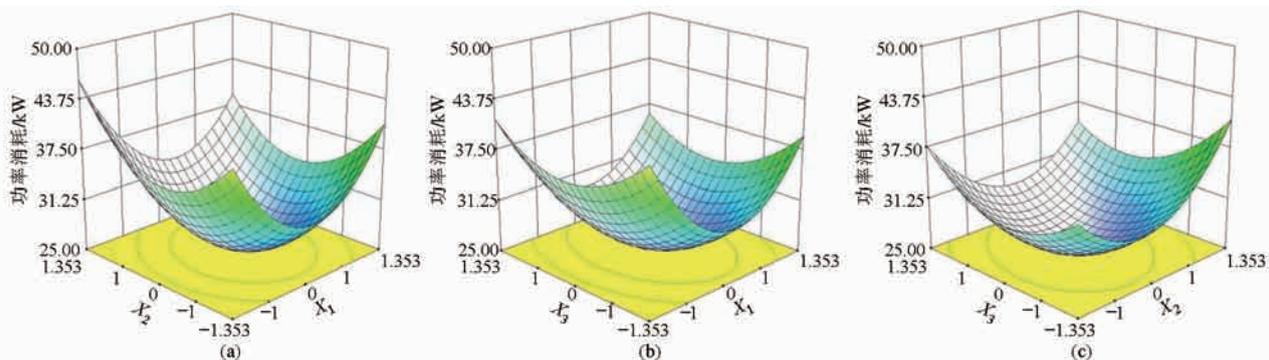


图7 交互因子对功率消耗的影响

Fig.7 Effects of interactive factors on power consumption

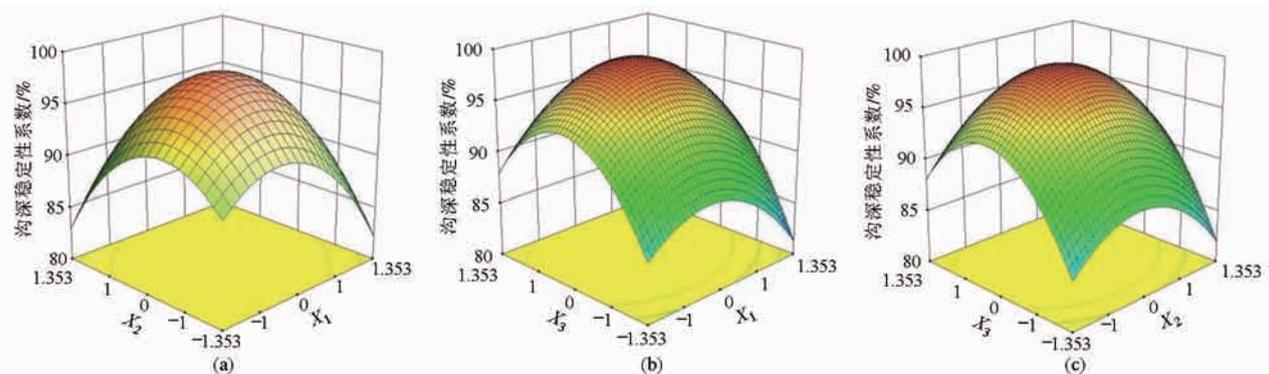


图8 交互因子对沟深稳定性系数的影响

Fig.8 Effects of interactive factors on stability of groove depth

#### 3.3.1 交互因子对功率消耗影响效应分析

由图7a知,在切土角为零值(实际值 $15^\circ$ )时,随着弯折角和弯曲半径的增大,功率消耗先减小后增大。当弯折角编码值在 $-1.0 \sim 0$ (实际值 $95^\circ \sim 110^\circ$ )、弯曲半径编码值在 $-1.0 \sim 0$ (实际值 $6 \sim 10\text{ mm}$ )范围内时,功率消耗有较小值,弯曲半径和弯折角对功率消耗的影响无交互作用。等高线图表明,功率消耗沿弯折角方向的变化速率较弯曲半径方向的变化速率大,即开沟作业时弯折角对功率消耗的影响大于弯曲半径对功率消耗的影响。

由图7b知,在弯曲半径为零值(实际值 $10\text{ mm}$ )时,随着弯折角和切土角的增大,功率消耗先减小后增大。当弯折角编码值在 $-1.353 \sim 0.5$ 时(实际值 $90^\circ \sim 117.5^\circ$ )、切土角编码值在 $-1.353 \sim 0.5$ (实际值 $10^\circ \sim 17^\circ$ )范围内时,功率消耗有较小值,弯折角和切土角对功率消耗的影响无交互作用。等高线图表明,功率消耗沿弯折角方向的变化速率较切土角

方向的变化速率大,即开沟时弯折角对功率消耗的影响大于切土角对功率消耗的影响。

由图7c知,在弯折角为零值(实际值 $110^\circ$ )时,随着弯曲半径和切土角的增大,功率消耗先减小后增大。当弯曲半径编码值在 $-1.0 \sim 0$ (实际值 $6 \sim 10\text{ mm}$ )、切土角编码值在 $-1.0 \sim 0$ (实际值 $11^\circ \sim 15^\circ$ )范围内时,功率消耗有较小值,弯曲半径和切土角对功率消耗的影响存在明显交互作用。等高线图表明,功率消耗沿弯曲半径方向的变化速率较切土角方向的变化速率高,即开沟工作时弯曲半径对功率消耗的影响大于切土角对功率消耗的影响。

另外由表3可知,弯折角、弯曲半径和切土角的 $F$ 值分别为 $15.62$ 、 $13.02$ 和 $20.31$ ,结合响应曲面及等高线图的分析,各因素对于功率消耗影响的贡献率从高到低依次为弯折角、切土角和弯曲半径。

#### 3.3.2 交互因子对沟深稳定性系数影响效应分析

由图8a知,在切土角为零值(实际值 $90^\circ$ )时,

随着弯曲半径和弯折角的增大,沟深稳定性系数先增大后减小。当弯曲半径编码值在  $-0.5 \sim 0.5$  (实际值  $8 \sim 12$  mm)、弯折角编码值在  $-0.5 \sim 0.5$  (实际值  $50^\circ \sim 100^\circ$ ) 范围内时,沟深稳定性系数有较大值,弯曲半径和弯折角对沟深稳定性系数的影响无交互作用。等高线图表明,沟深稳定性系数沿弯曲半径方向的变化速率较弯折角方向的变化速率大,即开沟作业时弯曲半径对沟深稳定性系数的影响大于弯折角对沟深稳定性系数的影响。

由图 8b 知,在弯曲半径为零值(实际值 10 mm)时,随着弯折角和切土角的增大,沟深稳定性系数先增大后减小。当弯折角编码值在  $0 \sim 1.0$  (实际值  $110^\circ \sim 125^\circ$ )、切土角编码值在  $0 \sim 1.0$  (实际值  $15^\circ \sim 19^\circ$ ) 范围内时,沟深稳定性系数有较大值,弯折角和切土角对沟深稳定性系数的影响无交互作用。等高线图表明,沟深稳定性系数沿切土角方向的变化速率较弯折角方向的变化速率大,即开沟作业时切土角对沟深稳定性系数的影响大于弯折角对沟深稳定性系数的影响。

由图 8c 知,在弯折角为零值(实际值  $110^\circ$ )时,随着弯曲半径和切土角的增大,沟深稳定性系数先增大后减小。当弯曲半径编码值在  $0 \sim 1.0$  (实际值  $10 \sim 14$  mm)、切土角编码值在  $0 \sim 1.0$  (实际值  $15^\circ \sim 19^\circ$ ) 范围内时,沟深稳定性系数有较大值,弯曲半径和切土角对沟深稳定性系数的影响无交互作用。等高线图表明,沟深稳定性系数沿切土角方向的变化速率较弯曲半径方向的变化速率大,即开沟工作时切土角对沟深稳定性系数的影响大于弯曲半径对沟深稳定性系数的影响。

另外由表 3 可知,弯折角、弯曲半径和切土角的  $F$  值分别为 23.07、21.25 和 24.36,结合响应曲面及等高线图的分析,各因素对于沟深稳定性系数影响的贡献率从高到低依次为切土角、弯折角和弯曲半径。

### 3.4 分析与讨论

由以上分析可知,单因子和交互因子试验对功率消耗的影响均呈先减小后增大的趋势,且在零值附近功率消耗有最小值。这是因为当弯折角、弯曲半径和切土角分别取小于且远离零值时,开沟刀片的过渡面首先与土壤发生切削行为,由于过渡面曲率半径小于侧切刃曲率半径,土壤切削时阻力较大,故消耗功率较大。当弯折角、弯曲半径和切土角分别取大于且远离零值时,开沟刀片的正切面首先与土壤发生切削行为,正切面的刃口较短,土壤切削能力小于侧切面,开沟时功率消耗也较大;当弯折角、弯曲半径和切土角分别取

零值附近时,侧切面首先与土壤发生切削行为,故功率消耗最小。

单因子和交互因子试验对沟深稳定性系数的影响均呈先增大后减小的趋势,这是因为随着弯折角、弯曲半径和切土角的增大,开沟刀片的过渡面、侧切面和正切面依次与土壤发生切削,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,刀片与土壤接触面积越小,刀片的切削能力越弱,土壤不易抛出沟外,故弯折角、弯曲半径和切土角的取值离零值越远,开沟深度波动越大,沟深稳定性系数越小。

## 4 参数优化与试验验证

### 4.1 参数优化

正弦指数曲线型开沟刀片优化的目的是获取最优的参数组合,在保证开沟质量的前提下,使功率消耗最小,起到节能减排和保护环境的作用。在此约束条件下,建立目标函数

$$f_1 = \min(Y_1) = 25.06 - 2.06X_1 + 0.59X_2 - 0.97X_3 - 0.5X_1X_3 + 9.49X_1^2 + 7.04X_2^2 + 4.91X_3^2$$

$$f_2 = \max(Y_2) = 88.04 - 0.65X_1 - 0.26X_2 + 3.59X_3 - 6.01X_1^2 - 6.18X_2^2 - 8.98X_3^2$$

约束条件

$$\begin{cases} X_1 \in [-1.353, 1.353] \\ X_2 \in [-1.353, 1.353] \\ X_3 \in [-1.353, 1.353] \end{cases}$$

利用 Matlab 软件进行优化计算,得到正弦指数曲线型开沟刀片最佳结构参数。参数优化结果为:  $X_1 = -0.45$ ,  $X_2 = 0.52$ ,  $X_3 = -0.60$ , 即弯折角为  $86.75^\circ$ , 弯曲半径为 12 mm, 切土角为  $13.8^\circ$ , 此时理论上功率消耗最小为 32.32 kW, 沟深稳定性系数为 95.6%。

### 4.2 试验验证

为验证优化后的最佳参数与优化效果,分别对优化后正弦指数曲线型开沟刀片结构参数(弯折角为  $86.75^\circ$ , 弯曲半径为 12 mm, 切土角为  $13.8^\circ$ )、优化前正弦指数曲线型开沟刀片结构参数(折弯角为  $110^\circ$ , 弯曲半径为 10 mm, 切土角为  $15^\circ$ )、以及现有开沟刀片(GB/T 5669—2008 弯刀 I T245, 弯折角  $60^\circ$ , 弯曲半径 30 mm, 正切刃滑切角  $43^\circ$ )进行开沟试验,人工设定土槽中土壤含水率 16.2%、土壤坚实度 0.39 MPa 和土壤含水率 20.7%、土壤坚实度 0.28 MPa 2 种土壤条件,测定相关性能指标,试验过程如图 9,试验结果如表 4,表中沟深  $h$  为开沟区域中 4 个测量点开沟深度实

测值。

由表4可知,优化后试验值与理论值误差均小于10%,由此证明所建立的回归模型是正确的。同时对优化前、优化后正弦指数曲线型开沟刀片,以及现有开沟刀片进行2种不同土壤条件下的对比试验,结果表明,优化后正弦指数曲线型开沟刀片功率消耗比优化前下降4.28 kW和4.23 kW,沟深稳定性系数提高7.12个百分点和7.02个百分点;比现有开沟刀片功率消耗下降7.68 kW和6.91 kW,沟深稳定性系数提高14.34个百分点和8.34个百分点。



图9 正弦指数曲线型开沟刀片土槽验证试验  
Fig.9 Validating experiment with soil bin for sine exponential curve blade

表4 参数优化前后开沟性能对比

Tab.4 Comparison of trenching performance before and after parameter optimization

试验性能	土壤含水率 16.2%, 土壤坚实度 0.39 MPa				土壤含水率 20.7%, 土壤坚实度 0.28 MPa			
	扭矩均值	功率消耗	沟深	沟深稳定性	扭矩均值	功率消耗	沟深	沟深稳定性
	$M/(N \cdot m)$	$Y_1/kW$	$h/cm$	系数 $Y_2/\%$	$M/(N \cdot m)$	$Y_1/kW$	$h/cm$	系数 $Y_2/\%$
优化前	1 562.04	37.62	30/42/40/28	83.30	1 464.89	35.28	35/41/47/31	84.25
	1 661.70	40.02	32/44/42/35	87.14	1 393.88	33.57	32/40/48/32	82.54
	1 644.67	39.61	35/43/40/35	91.06	1 546.68	37.25	38/32/47/35	85.23
	1 537.55	37.03	32/43/46/31	82.64	1 470.28	35.41	30/38/46/35	84.41
	1 597.34	38.47	33/44/46/33	84.77	1 442.05	34.73	30/34/43/35	86.71
	平均值	38.55		85.78		35.25		84.62
优化后	1 456.17	35.07	36/44/41/35	90.72	1 248.97	30.08	32/34/43/35	88.37
	1 595.27	38.42	38/43/40/38	94.58	1 387.24	33.41	35/36/43/36	91.46
	1 336.58	32.19	36/38/44/40	92.51	1 226.14	29.53	38/35/43/37	92.29
	1 423.37	34.28	36/45/40/37	91.13	1 227.80	29.57	34/42/38/37	92.57
	1 303.37	31.39	38/43/40/40/	95.56	1 349.87	32.51	35/38/42/38	93.49
	平均值	34.27		92.9		31.02		91.64
现有开沟刀片	1 604.82	38.65	28/34/19/20	75.69	1 524.82	36.72	33/28/41/47	80.42
	1 742.45	41.97	31/28/25/38	84.19	1 438.92	34.66	28/42/30/36	83.89
	1 735.04	41.79	36/24/31/40	81.76	1 623.71	39.11	30/42/34/47	82.62
	1 801.92	43.40	29/34/18/22	76.00	1 562.48	37.63	30/41/28/25	80.51
	1 824.19	43.94	35/42/28/21	75.15	1 725.39	41.55	37/35/43/32	89.05
	平均值	41.95		78.56		37.93		83.30

## 5 结论

(1)在满足作业质量的前提下,各因子对功率消耗的影响贡献由大到小为:弯折角、切土角和弯曲半径;对沟深稳定性系数的影响贡献由大到小为:切土角、折弯角和弯曲半径。

(2)功率消耗与弯曲半径、切土角、折弯角的关系均为下凹曲线,当折弯角为 $110^\circ$ 、弯曲半径为11.28 mm、切土角为 $16^\circ$ 时,功率消耗分别取得最小值;沟深稳定性系数与弯曲半径、切土角两个因子的关系均为上凸曲线,弯曲半径对沟深稳定性系数的影响不显著,当折弯角为 $95.75^\circ$ 、切土角为 $12^\circ$ ,沟深稳定性系数分别取得最大值。

(3)通过优化得到正弦指数曲线型开沟刀片结

构参数的最优组合为:弯折角为 $86.75^\circ$ ,弯曲半径为12 mm,切土角为 $13.8^\circ$ ,此时理论上功率消耗最小为32.32 kW,沟深稳定性系数为95.6%,优化后验证试验可得功率消耗最小为34.27 kW,沟深稳定性系数为92.9%,试验结果与理论结果一致,进一步验证了回归模型的正确性。在土壤含水率16.2%、坚实度0.39 MPa和土壤含水率20.7%、坚实度0.28 MPa条件下,优化后正弦指数曲线型开沟刀片功率消耗比优化前下降4.28 kW和4.23 kW,沟深稳定性系数提高7.12个百分点和7.02个百分点;比现有开沟刀片功率消耗下降7.68 kW和6.91 kW,沟深稳定性系数提高14.34个百分点和8.34个百分点。研究成果为正弦指数曲线型开沟刀片的优化设计提供了理论参考。

## 参 考 文 献

- 1 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)
- 2 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)
- 3 陈朝海,段洁利,闫国琦,等. 果园开沟机研究现状与发展对策[J]. 现代农业装备,2013(2):64-68.  
CHEN Chaohai, DUAN Jieli, YAN Guoqi, et al. Research status and development countermeasure of ditching machine in orchard[J]. Modern Agricultural Equipment,2013(2):64-68. (in Chinese)
- 4 梁方. 草地切根施肥补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 reseeded compound remediation machine for grassland[D]. Beijing:China Agricultural University,2015. (in Chinese)
- 5 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)
- 6 彭嵩植,曲国良. 旋耕弯刀切土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)
- 7 张居敏,周勇,夏俊芳,等. 旋耕埋草机螺旋横刀的数学建模与参数分析[J]. 农业工程学报,2013,29(1):18-25.  
ZHANG Jumin, ZHOU Yong, XIA Junfang, et al. Mathematical modeling and analysis of helical blade for stubble burying rotary tiller[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(1):18-25. (in Chinese)
- 8 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)
- 9 彭嵩植,吴德光. 旋耕机工作部件设计方法的研究(一)[J]. 江苏大学学报:自然科学版,1982(3):5-25.  
PENG Songzhi, WU Deguang. Research of rotary cultivator design method for the working parts ( I ) [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition,1982(3):5-25. (in Chinese)
- 10 彭嵩植,吴德光. 旋耕机工作部件设计方法的研究(二)[J]. 江苏大学学报:自然科学版,1983(1):41-55.  
PENG Songzhi, WU Deguang. Research of rotary cultivator design method for the working parts ( II ) [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition,1983(1):41-55. (in Chinese)
- 11 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)
- 12 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]. 农业工程学报,2012,28(12):24-30.  
JI Wenfeng, JIA Honglei, TONG Jin. Experiment on working performance of bionic blade for soil-rototilling and stubble-breaking [J]. Transactions of the CSAE,2012,28(12):24-30. (in Chinese)
- 13 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.
- 14 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]. 农业工程学报,2014,30(6):9-16.  
TIAN Subo, YANG Jifeng, WANG Ruili, et al. Optimization experiment of operating parameters on vibration sorting clipdevice for vegetable grafting machine[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(6):9-16. (in Chinese)
- 15 王永维,唐海燕,王俊,等. 蔬菜钵苗高速移栽机吊杯式移栽器参数优化[J]. 农业机械学报,2016,47(1):91-99.  
WANG Yongwei, TANG Yanhai, WANG Jun, et al. Parameter optimization for dibble-type planting apparatus of vegetable pot seed transplanter in high-speed condition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(1):91-99. (in Chinese)
- 16 汲文峰,贾洪雷,佟金,等. 通用刀片功率消耗影响因素分析与田间试验[J]. 农业机械学报,2010,41(2):35-41.  
JI Wenfeng, JIA Honglei, TONG Jin, et al. Analysis of influencing factors on power consumption and field test of universal blade [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(2):35-41. (in Chinese)
- 17 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 bionicripple opener[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(5):36-41. (in Chinese)

- 11 HAN J W, ZHAO C J, YANG X T, et al. Computational modeling of airflow and heat transfer in a vented box during cooling: optimal package design[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 91: 883 – 893.
- 12 韩佳伟,赵春江,杨信廷,等. 送风风速对苹果差压预冷性能的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 280 – 289.  
HAN Jiawei, ZHAO Chunjiang, YANG Xinting, et al. Effect of air-flow velocity on cooling efficiency during forced-air precooling of apples[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11): 280 – 289. (in Chinese)
- 13 JOHNSON T A, PATEL V C. Flow past a sphere up to a Reynolds number of 300[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1999, 378: 19 – 70.
- 14 ABHAYAWICK L, LAGUERRE J C, TAUZIN V, et al. Physical properties of three onion varieties as affected by the moisture content[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 55(3): 253 – 262.
- 15 BECKER B R, MISRA A, FRICKE B A. Bulk refrigeration of fruits and vegetables part I: theoretical considerations of heat and mass transfer[J]. *HVAC & R Research*, 1996, 2(2): 122 – 134.
- 16 HAN J W, ZHAO C J, YANG X T, et al. Computational fluid dynamics simulation to determine combined mode to conserve energy in refrigerated vehicles [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2016, 39(2): 186 – 195.
- 17 韩佳伟,赵春江,杨信廷,等. 基于 CFD 数值模拟的冷藏车节能组合方式比较[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(19): 55 – 62.  
HAN Jiawei, ZHAO Chunjiang, YANG Xinting, et al. Comparison of combination mode of energy conservation for refrigerated car based on CFD numerical simulation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(19): 55 – 62. (in Chinese)
- 18 赵春江,韩佳伟,杨信廷,等. 基于 CFD 的冷藏车车厢内部温度场空间分布数值模拟[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(11): 168 – 173.  
ZHAO Chunjiang, HAN Jiawei, YANG Xinting, et al. Numerical simulation of temperature field distribution in refrigerated truck based on CFD[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(11): 168 – 173. (in Chinese)
- 19 DEFRAEYE T, BLOCKEN B, CARMELIET J. Analysis of convective heat and mass transfer coefficients for convective drying of a porous flat plate by conjugate modelling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(1 – 3): 112 – 124.
- 20 CHENG N S. Comparison of formulas for drag coefficient and settling velocity of spherical particles [J]. *Powder Technology*, 2009, 189(3): 395 – 398.
- 21 DURET S, HOANG H M, FLICK D, et al. Experimental characterization of airflow, heat and mass transfer in a cold room filled with food products[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 46: 17 – 25.

~~~~~  
(上接第 99 页)

- 18 顾耀权,贾洪雷,郭慧,等. 滑刀式开沟器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(5): 38 – 42.  
GU Yaoquan, JIA Honglei, GUO Hui, et al. Design and experiment of sliding knife furrow opener[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5): 38 – 42. (in Chinese)
- 19 JB/T 11908—2014 农用圆盘开沟机[S]. 2014.
- 20 GRISSO R B, HOLSHOUSER D, PITMAN R. Planter drill considerations for conservation tillage systems[R]. Virginia Cooperative Extension, Publication Number: 442 – 457, 2007.
- 21 GRISSO R B, HOLSHOUSER D. Equipment considerations for no-till soybean seeding [R]. Virginia Cooperative Extension, Publication Number: 442 – 456, 2002.
- 22 朱瑞祥,李成鑫,程阳,等. 被动式圆盘刀作业性能优化试验[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(18): 47 – 54.  
ZHU Ruixiang, LI Chengxin, CHENG Yang, et al. Working performance of passive disc coulter [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(18): 47 – 54. (in Chinese)
- 23 林静,李博,李宝筏,等. 阿基米德螺旋型缺口圆盘破茬刀参数优化与试验[J]. *农业机械学报*, 2014, 44(6): 1 – 9.  
LIN Jing, LI Bo, LI Baofa, et al. Parameter optimization and experiment on archimedes spiral type gap cutting disc [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 44(6): 1 – 9. (in Chinese)
- 24 赵旭,张祖立,唐萍. 被动式倾斜波纹圆盘刀破茬刀工作性能试验[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(5): 64 – 67.  
ZHAO Xu, ZHANG Zuli, TANG Ping. Passive tilt corrugated disc cutter knife stubble-breaking performance test [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(5): 64 – 67. (in Chinese)
- 25 彭飞,李腾飞,康宏彬,等. 小型制粒机喂料器参数优化与试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 51 – 58.  
PENG Fei, LI Tengfei, KANG Hongbin, et al. Optimization and experiment on feeder for small scale pellet mill [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2): 51 – 58. (in Chinese)