

铲式宽苗带燕麦播种开沟器设计与试验

刘瑞^{1,2} 李衍军² 刘春晓³ 刘立晶^{2,4}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083;

3. 内蒙古拉布大林农牧场, 呼伦贝尔 022250; 4. 土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为解决砂壤土条件下, 播种开沟器开出种沟较窄, 无法适应燕麦宽苗带种植的问题, 结合滑切工作原理, 设计了一种宽苗带减阻燕麦播种机开沟器。阐述铲式开沟器工作原理, 确定刃口曲线方程; 通过分析挡土曲面的作业阻力和宽苗带种沟成因, 确定挡土曲面主要结构参数取值。采用 EDEM 仿真分析方法, 以开沟器作业阻力、种沟宽度变异系数为试验响应指标进行三元二次正交旋转组合试验, 得到可信的回归数学模型; 分析各因素交互作用对开沟器工作性能的影响规律; 利用遗传算法 NSGA-Ⅱ 对回归数学模型进行多目标优化, 并进行土槽验证试验, 得出其最优参数组合为: 播深 41 mm、入土角 24°、开沟器宽度 107 mm, 此时作业阻力为 727.1 N, 种沟宽度变异系数为 9.92%; 土槽验证试验得到作业阻力平均值为 789.07 N, 种沟宽度变异系数平均值为 10.69%, 与优化结果的误差分别为 8.52%、7.76%。播种对比试验进一步表明作业效果满足宽苗带燕麦种植开沟农艺要求。

关键词: 燕麦; 宽苗带; 开沟器; 遗传算法; 正交试验

中图分类号: S985.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)09-0089-08 OSID: 

Design and Experiment of Shovel Type Wide Seedling Belt Oat Seeding Furrow Opener

LIU Rui^{1,2} LI Yanjun² LIU Chunxiao³ LIU Lijing^{2,4}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

3. Labdalin Farm in Inner Mongolia, Hulunbuir 022250, China

4. State Key Laboratory of Soil - Plant - Machinery System Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem that the seed groove opened by furrow opener is narrow and can not adapt to the wide seedling belt of oats in sandy loam soil, based on the working principle of sliding cutting, a type of furrow opener for oat sowing was designed which can realize wide seeding belt and reduce resistance. The working principle of the furrow opener was described and the curve equation of the cutting edge was determined. The main structural parameters of the retaining surface were determined by analyzing the working resistance of the retaining surface and the cause of the seed trench with wide seedling belt. The EDEM simulation analysis method was used to carry out the ternary quadratic orthogonal rotation combination test with the operating resistance of furrow opener and the variation coefficient of seed groove width as the test response indexes, and a credible regression mathematical model was obtained. The effect of the interaction of various factors on the performance of the furrow opener was analyzed. Using genetic algorithm NSGA - Ⅱ regression mathematical model for multi-objective optimization, and taking soil bin as verification test, it was concluded that the optimal parameter combination was as follows: the sowing depth was 41 mm, the angle of penetration was 24°, and the width of the furrow opener was 107 mm. At this time, the operating resistance was 727.1 N, and the variation coefficient of the seed groove width was 9.92%. The average value of the working resistance obtained from the soil bin verification test was 789.07 N, the average variation coefficient of seed groove width was 10.69%, compared with the optimization results, the errors were 8.52% and 7.76%, respectively. The results showed that the working effect could meet the agronomic requirements of wide seeding zone oat planting.

Key words: oat; wide seeding belt; opener; genetic algorithm; orthogonal test

收稿日期: 2020-11-23 修回日期: 2020-12-20

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目

作者简介: 刘瑞(1990—), 男, 博士生, 主要从事农业机械设计与理论研究, E-mail: ruiliuqiusuo@163.com

通信作者: 刘立晶(1976—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事种植机械装备研究, E-mail: xyliulj@sina.com

0 引言

燕麦是一种优质的粮饲兼用型作物^[1],其茎叶可作为牲畜的精料^[2],燕麦籽粒具有独特的营养价值和保健价值^[3-4]。研究调研发现,目前燕麦多采用传统方式播种,宽4~5 cm的种沟不利于燕麦形成群体冠层结构、提升燕麦群体光合作用、形成有效分蘖,进而限制燕麦单产量^[5]。近年来随着燕麦种植面积持续增加,农艺专家提出了宽幅条播(宽苗带)种植模式。燕麦专用宽苗带播种开沟器无法开出适于宽苗带种植的种沟,播种效果不理想,达不到宽苗带机械化播种要求。

开沟器是机械化播种的关键作业部件。针对不同种子和种植农艺需求,近年来研究者对开沟器进行了广泛研究。为了实现集开沟覆土镇压于一体的结构,赵淑红等^[6]设计了一种多功能集成式播种开沟器。针对深施肥,开沟器回土能力弱,刘宏俊等^[7]设计了一种上宽下窄滑推式开沟器。为了开出紧实种沟,提高种床质量和播深一致性,适用于小株距圆粒种子,贾洪雷等^[8]设计出一种适用于大豆垄上双行种植模式的仿形滑刀式开沟器。为了满足油菜、小麦精量播种和成苗率要求,根据仿形机构的弹性形变与仿形阻力及仿形量之间的关系,王磊等^[9]设计了一种能够实现仿形功能的油麦兼用仿形开沟器。综上所述,现有开沟器研究集中于提高开沟质量、回土、镇压,以及满足不同种子不同株距的开沟装置。而适用于北方砂壤土条件,宽苗带燕麦机械化播种的开沟装置有待进一步研究。

为解决现有开沟器开出种沟较窄无法满足宽苗带播种的问题,本文针对砂壤土条件,基于铲式开沟器设计一种宽苗带燕麦播种机开沟器,通过建立关键参数的数学模型,并通过三元二次回归正交试验确定开沟器最佳组合作业参数,对燕麦宽幅条播种模式加以验证。

1 开沟器总体结构与工作原理

1.1 开沟器结构

开沟器主要由铲柄、滑切部分、挡土板、分种板等组成,如图1所示,主要工作部分为滑切部分和挡土板,滑切部分的滑切曲线完成滑切、松土后,由挡土板强制开出种沟,保证种子经导种管下落后,在分种板的分散作用下,种子能以相同的播深相对均匀分布在种沟内侧,形成苗带。

1.2 工作原理

播种作业时,开沟器滑切刃尖与土壤水平面以一定入土角接触,滑切部分对土壤产生滑切、挤压,

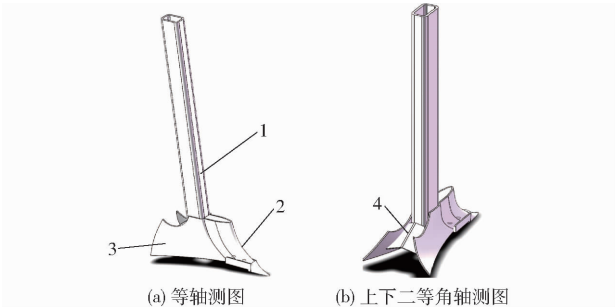


图1 开沟器结构示意图

Fig. 1 Schematics of opener structure

1. 铲柄 2. 滑切部分 3. 挡土板 4. 分种板

使聚集的土壤颗粒分散开来,开出种沟锥形,在前窄后宽挡土板进一步挤压作用下,将窄种沟扩宽并稳固为满足燕麦种植农艺要求的完整种沟,完成开沟环节;种子经导种管落至分种板,种子在分种板面跳动,分落至种沟底部。

2 开沟器设计

开沟器作业性能影响因素主要分为外界因素和结构设计因素,外界因素有土壤类型、紧实度、含水率和作业速度、深度等^[10];结构设计因素为开沟器作业面的滑切曲线类型、挡土板曲面形状。

2.1 开沟器曲面设计

犁体曲面导曲线有直线型、圆弧型、抛物线型、指数曲线型^[11],曲面形状具有更好的力学特性^[12],随着作业速度递增,开沟器牵引阻力增长速率满足规律:直线型最大、抛物线次之、指数曲线最小^[13],综合上述研究成果,为设计出合理滑切曲线和入土角,本文选取指数函数作为开沟器刃口曲线,建立如图2所示的直角坐标系。令入土点A点坐标(x_1, y_1),滑切曲线终点B点坐标(x_2, y_2)。

设滑切曲线方程为

$$y = a^x \quad (a > 1) \tag{1}$$

式中 a ——刃口曲线的底数
点A、B的斜率为

$$\begin{cases} y'_A = \tan\beta_1 = a^{x_1} \ln a \\ y'_B = \tan\beta_2 = a^{x_2} \ln a \end{cases} \tag{2}$$

式中 β_1 ——滑切曲线入土角, ($^\circ$)

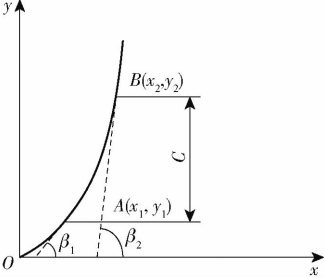


图2 刃口曲线设计示意图

Fig. 2 Diagram of blade curve design

β_2 ——滑切曲线终止角, ($^\circ$)
联立式(1)、(2)可得

$$a = e^{\frac{\tan\beta_2 - \tan\beta_1}{C}} \tag{3}$$

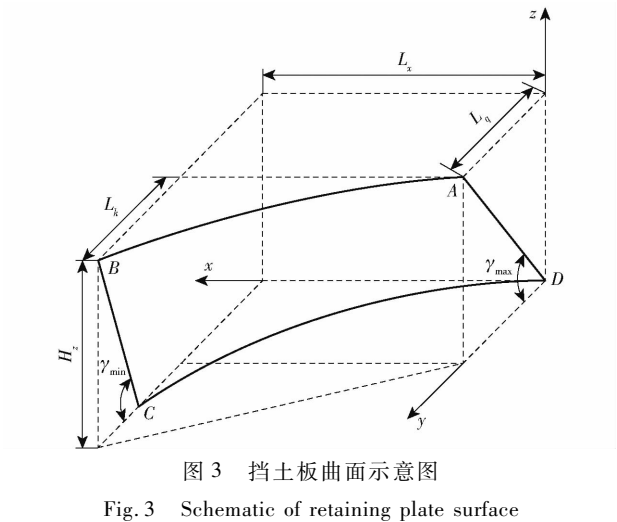
其中 $C = y_2 - y_1$
式中 C ——滑切曲面高度, mm
综合可得滑切曲线方程为

$$y = \left(e^{\frac{\tan\beta_2 - \tan\beta_1}{C}} \right)^x \tag{4}$$

由式(4)可知,滑切曲线的形状由入土角 β_1 、滑切曲线终止角 β_2 和 C 确定。由文献[14]结合燕麦种植农艺要求, C 确定为 100 mm。

2.2 挡土板曲面设计

铲或犁体触土曲面由水平直线元沿着导曲线以不同的高度和不同的直元线角平行移动而形成^[14-16],如图 3 所示,沿着导曲线 AB 或 DC 直元线角逐渐减小形成挡土曲面。



2.3 主要参数确定

2.3.1 入土角 β_1

适宜的入土角 β_1 能确保刃口曲线以最小的阻力,将聚集的土壤颗粒分散开来,当开沟器在土壤中作业时,刃口曲线上点 A 受力分析如图 4 所示。

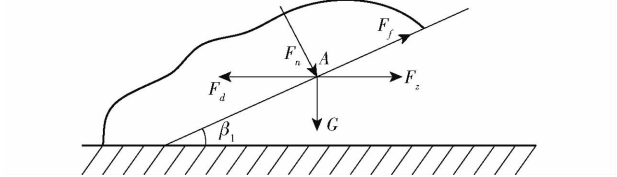


图 4 刃口曲线上点 A 受力示意图
Fig. 4 Diagram of force on point A on cutting edge curve

以受力点 A 为坐标原点,建立水平坐标系,xy 方向上的受力平衡方程为

$$\begin{cases} F_d - F_f \cos\beta_1 - F_z - F_n \sin\beta_1 = 0 \\ F_f \sin\beta_1 - G - F_n \cos\beta_1 = 0 \end{cases} \tag{5}$$

其中 $F_f = \mu F_n$ (6)

式中 F_n ——土壤对刃口面的法向力, N
 F_f ——土壤与刃口面间的摩擦力, N
 F_z ——土壤对刃口面的切向阻力, N
 F_d ——机具对铲的拉力, N
 G ——土壤重力, N
 μ ——土壤与开沟器的摩擦因数
由式(5)可得

$$\beta_1 = \arcsin \left(\frac{F_d - F_z + G}{F_n (\mu + 1)} - \frac{\pi}{4} \right) \tag{7}$$

参照文献[12]中入土角的设计方法,开沟器工作过程中入土角 β_1 越大,受到土壤阻力越大,入土角 β_1 不应大于 38° , 本文将利用仿真对该参数进行优化。

2.3.2 挡土曲面参数

开沟器作业时,由挡土曲面完成对土壤的侧翻、挤压形成种沟,而挡土曲面的组合结构参数是影响开沟器阻力的关键因素^[17-18],抛物线型挡土曲面具有很好的减阻性能^[19]。由图 3 可知,当结构参数设定时,挡土板的曲面形状由导曲线决定,若设挡土曲面扰动单位体积土壤受到的阻力为 F_γ ,则开沟器受到的作业阻力为

$$F = F_\gamma (\gamma_{\max}, \gamma_{\min}, L_z, H_z, T) V \tag{8}$$

其中 $V = L_k H_w S_w$ (9)

式中 $\gamma_{\min}$ ——挡土曲面最小直元线角, ($^\circ$)
 $\gamma_{\max}$ ——挡土曲面最大直元线角, ($^\circ$)
 L_z ——挡土曲面导曲线长度, mm
 H_z ——挡土曲面高度, mm
 T ——导曲线类型
 V ——挡土曲面扰动土壤体积, mm^3
 L_k ——开沟器作业宽度, mm
 H_w ——开沟深度, mm
 S_w ——开沟器作业距离, m

由式(9)可知,开沟器作业宽度 L_k 和导曲线长度 L_z 决定挡土曲面扰动土壤体积,也是影响作业阻力的直接因素;适宜 L_k 可以保证开沟器在较小的作业阻力和扰土体积下,开出满足播种要求的种沟。

根据燕麦播种种植农艺要求,种沟沟深 30 ~ 50 mm,沟宽 100 ~ 200 mm,根据开沟器作业阻力分析可知开沟器作业宽度 L_k 偏大或偏小,均会影响种沟质量,故取 L_k 为 80 ~ 100 mm;导曲线过长增加开沟器与土壤间的摩擦损耗,导曲线过短,无法达到挡土、开出有效种沟的要求,参照船式开沟犁设计方法^[20],拟取 L_z 为 300 mm。

为了保证开沟器挡土曲面能对经刃口分散开来的土壤充分发挥整形作用,应满足

$$H_d + H_w \leq H_z \tag{10}$$

式中 H_d ——开沟器两侧土壤堆积高度,mm

依据式(10)可推知开沟器挡土曲面高度 H_z 应高于其开沟深度,故取 H_z 为 40 ~ 70 mm。

参照文献[11],当 $\gamma_{\min}$ 为 40°时,直线元犁体能够顺利入土;因为直线元犁体直线元角的最大适宜变化量为 5°,所以 $\gamma_{\max}$ 设计为 45°。

3 EDEM 仿真

3.1 仿真试验目的与方法

为了确定开沟器最佳组合参数,获得符合燕麦播种要求的种沟,结合上述分析,以开沟器宽度、入土角、播深为影响种沟质量的主要因素,以开沟器作业阻力、种沟宽度变异系数为评价指标进行仿真回归正交试验,确定其最佳参数组合。

3.2 土壤模型及开沟器几何仿真模型构建

内蒙古地区燕麦种植土壤多为砂壤土,依据文献对砂壤土参数的标定^[21-22]和田间实际测量,本文选用半径为 6 mm 的球形颗粒来构造土壤模型,土壤泊松比为 0.38,剪切模量为 1×10^6 Pa,土壤密度为 2 550 kg/m³,土壤与土壤之间静摩擦因数和动摩擦因数分别为 0.45、0.21,土壤单位面积法向刚度为 1×10^9 N/m³,土壤单位面积切向刚度为 5×10^8 N/m³;钢泊松比为 0.3,钢剪切模量为 7.9×10^4 MPa,土壤与开沟器间静摩擦因数和动摩擦因数分别为 0.5、0.05,土壤与开沟器间恢复系数为 0.6。本文土壤仿真颗粒采用 Hertz Mindlin with Bonding 接触模型,土壤接触参数为颗粒粘结半径为 6 mm,粘结法向刚度为 1×10^9 N/m,粘结切向刚度为 5×10^8 N/m,粘结法向临界应力是 2.5×10^4 Pa,粘结切向临界应力是 2.5×10^4 Pa。

利用 SolidWorks 构建开沟器三维模型并导入 EDEM 软件中,其与长为 1 200 mm、宽为 300 mm、高为 200 mm 的土壤模型共同组成本文的仿真模型,如图 5 所示。

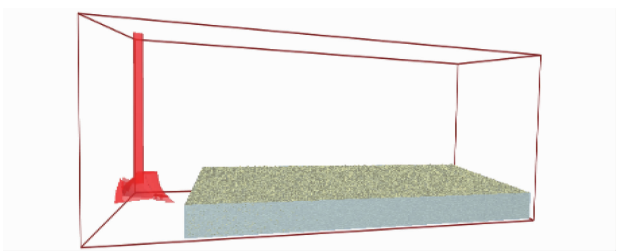


图 5 开沟器和土壤 EDEM 仿真模型

Fig. 5 Trench cutters and soil EDEM simulation models

3.3 种沟宽度稳定性测量

在相同播量条件下,种沟宽度过小,燕麦苗会争水、争肥,降低光合作用,不利于形成分蘖,从而影响燕麦产量。种沟宽度测量时,开沟器作业 10 m,沿

成型种沟中段取 5 m,等间距取 5 个垂直于开沟器前进方向的断面,将测量的断面下底边长度作为测量点种沟宽度,计算得到种沟宽度变异系数。

4 正交试验

根据回归正交试验设计原理^[23],对开沟器宽度、入土角、播深进行三元二次回归正交旋转组合设计来进行试验分析,试验因素编码如表 1 所示。

表 1 试验因素编码

Tab. 1 Codes of test factors

编码	因素		
	播深/mm	入土角/(°)	开沟器宽度/mm
1. 682	50	25	120
1	46	23	112
0	40	20	100
-1	34	17	88
-1. 682	30	15	80

4.1 试验方案与结果

根据三元二次回归正交旋转组合设计,需要安排 23 组试验。试验方案与结果如表 2 所示, x_1 、 x_2 与 x_3 为因素编码值,作业阻力 F 与种沟宽度变异系数 λ 为响应指标。

由表 3 和表 4 可知,两指标的回归模型均极显著($P < 0.01$),拟合效果较好。为了获得简化的回归预测模型,本文剔除表 3 和表 4 中的不显著项,建立每个试验指标在因素空间内的回归方程。

表 2 试验方案与结果

Tab. 2 Test plan and results

序号	因素			F/N	$\lambda/\%$
	x_1	x_2	x_3		
1	1	1	1	987.65	14.96
2	1	1	-1	952.07	21.26
3	1	-1	1	860.69	15.09
4	1	-1	-1	836.87	21.82
5	-1	1	1	904.25	10.12
6	-1	1	-1	863.24	21.61
7	-1	-1	1	771.64	12.08
8	-1	-1	-1	713.92	19.54
9	1.682	0	0	934.52	18.16
10	-1.682	0	0	815.29	9.63
11	0	1.682	0	967.85	15.26
12	0	-1.682	0	770.12	14.38
13	0	0	1.682	838.60	10.74
14	0	0	-1.682	796.57	29.23
15	0	0	0	850.64	14.79
16	0	0	0	811.16	10.92
17	0	0	0	803.35	16.15
18	0	0	0	845.48	15.36
19	0	0	0	816.38	12.49
20	0	0	0	790.72	14.13
21	0	0	0	824.65	18.09
22	0	0	0	810.23	14.55
23	0	0	0	798.91	13.39

表 3 二次回归方程模型作业阻力 F 方差分析

Tab.3 Variance analysis of quadratic regression equation model work resistance F

来源	自由度	方差和	均方差	F	P
x_1	1	29 862.34	29 862.34	177.26	<0.000 1 **
x_2	1	50 199.47	50 199.47	297.99	<0.000 1 **
x_3	1	4 239.91	4 239.91	25.17	0.000 2 **
x_1^2	1	15 984.47	15 984.47	94.88	<0.000 1 **
x_2^2	1	4 256.31	4 256.31	25.27	0.000 2 **
x_3^2	1	802.78	802.78	4.77	0.048 *
$x_1 x_2$	1	3 818.07	3 818.07	22.66	0.000 4 **
$x_1 x_3$	1	1 144.09	1 144.09	6.79	0.021 8 *
$x_2 x_3$	1	450.75	450.75	2.68	0.125 9
回归	9	110 700	12 302.33	73.03	<0.000 1 **
残差	13	2 190.02	168.46		
总和	22	112 890			

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

表 4 二次回归方程模型种沟宽度变异系数 λ 方差分析

Tab.4 Variance analysis of quadratic regression equation model variation coefficient of seed groove width λ

来源	自由度	方差和	均方差	F	P
x_1	1	13.78	13.78	5.72	0.032 6 *
x_2	1	3.69	3.69	1.53	0.237 6
x_3	1	67.04	67.04	27.85	0.000 1 **
x_1^2	1	11.75	11.75	4.88	0.045 8 *
x_2^2	1	2.59	2.59	1.08	0.318 1
x_3^2	1	32.12	32.12	13.34	0.002 9 **
$x_1 x_2$	1	0.98	0.98	0.41	0.534 5
$x_1 x_3$	1	31.68	31.68	13.16	0.003 1 **
$x_2 x_3$	1	1.62	1.62	0.67	0.426 8
回归	9	165.19	18.35	7.62	0.000 6 **
残差	13	31.3	2.41		
总和	22	196.49			

作业阻力回归方程为

$$F = 812.4 + 46.76x_1 + 60.63x_2 + 17.62x_3 - 21.85x_1x_2 + 11.96x_1x_3 + 31.71x_1^2 + 16.36x_2^2 - 7.11x_3^2$$

(11)

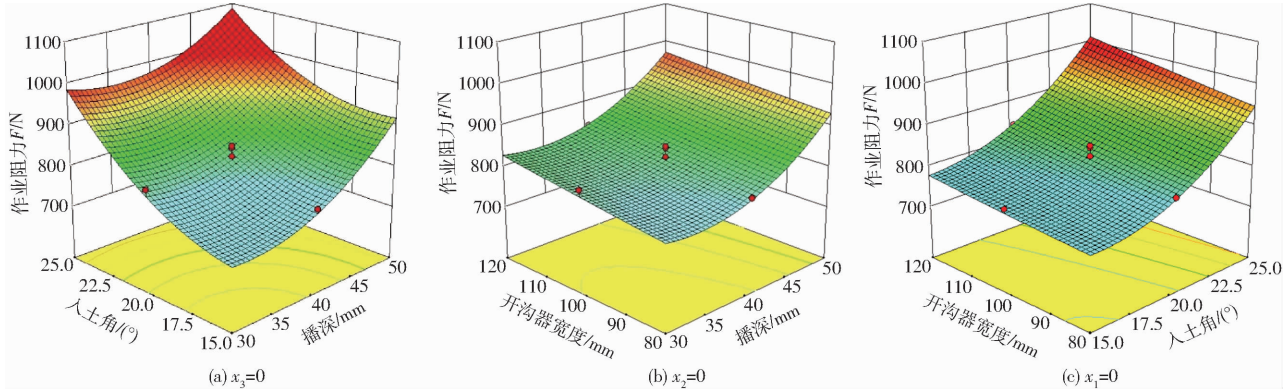


图 6 各因素交互作用对作业阻力影响的响应曲面

Fig.6 Response surface diagrams of each factor interaction to working resistance

拟合后的回归方程决定系数 $R^2 = 0.929\ 8$,表明试验因素和试验指标存在显著的二次关系。

种沟宽度变异系数回归方程为

$$\lambda = 14.09 + x_1 - 2.22x_3 + 1.99x_1x_3 + 0.86x_1^2 + 1.42x_3^2$$

(12)

拟合后的回归方程决定系数 $R^2 = 0.862\ 5$,表明试验因素和试验指标存在显著的二次关系。

4.2 响应曲面分析

4.2.1 作业阻力响应曲面分析

由式(11)可得各因素的交互作用对作业阻力有显著的影响。由图 6b、6c 可知,对于作业阻力,当开沟器的宽度一定时,随着播深和入土角的增大,作业阻力均呈上升的趋势,其中入土角对作业阻力影响最大;而当入土角或播深一定时,作业阻力随着开沟器宽度的增加,并无明显增大;原因是所设计的开沟器宽度较窄,在设定的试验数值范围内,对作业阻力的影响更小。由图 6a 可知,随着入土角和播深同时增加,在两者的交互作用下,作业阻力上升的速率较快。

4.2.2 种沟宽度变异系数响应曲面分析

由图 7a、7c 可明显得出,入土角的变化对种沟宽度变异系数的影响很弱;由图 7a、7b 可知,在开沟器宽度和入土角取一定值时,种沟宽度变异系数随着播深的增加而增加;由图 7b、7c 可知,开沟器宽度的变化,会引起种沟宽度变异系数的明显变化。

4.3 NSGA-Ⅱ 算法参数优化

NSGA-Ⅱ 算法能够采用快速非支配排序算法,很好地解决多目标参数优化问题^[24],本文以作业阻力和种沟宽度变异系数为优化目标,以播深、入土角、开沟器宽度为优化参数进行研究。多目标优化目的是得到一组满足作业阻力小、种沟宽度变异系数小的开沟器最优解,从 Pareto 最优解集中选取一组非劣解。因此优化问题的目标函数和约束条件为

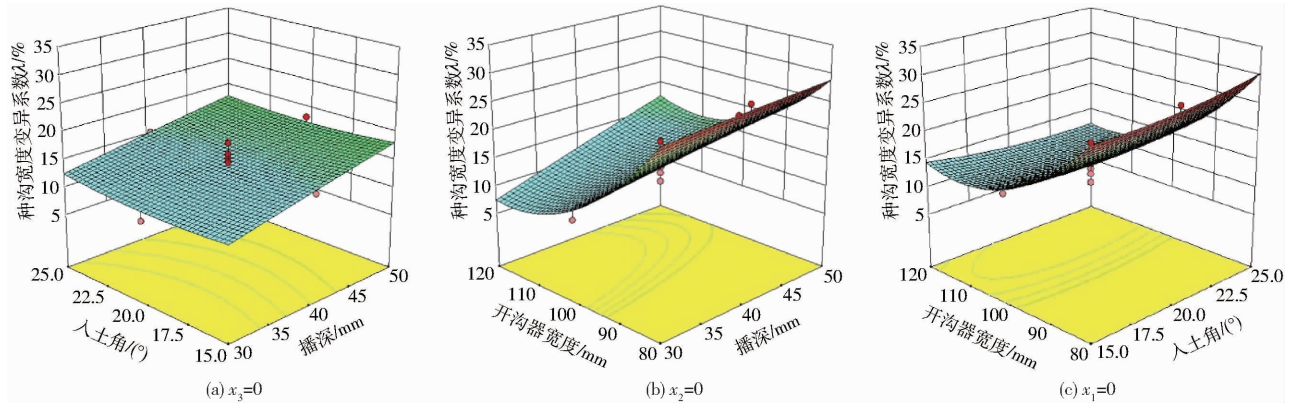


图 7 各因素交互作用对种沟宽度变异系数影响的响应曲面

Fig. 7 Response surface diagrams of variation coefficient of seed groove width under interaction of various factors

$$\begin{cases} \min F(x_1, x_2, x_3) \\ \min \lambda(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1.682 \leq x_1 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq x_2 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq x_3 \leq 1.682 \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

基于 NSGA-II 算法得到的 Pareto 最优解曲线如图 8 所示,本文是两个目标函数优化的问题,需要对两个目标函数进行权衡,以便使开沟器的综合作业效果最好,在兼顾作业阻力和开沟宽度变异系数的原则下,根据优于准则从最优解集中选取一组最优解^[25],并对最优解进行水平值与实际值编码转换,得到播深为 41 mm、入土角为 24°、开沟器宽度为 107 mm,此时作业阻力为 727.1 N,种沟宽度变异系数为 9.92%。

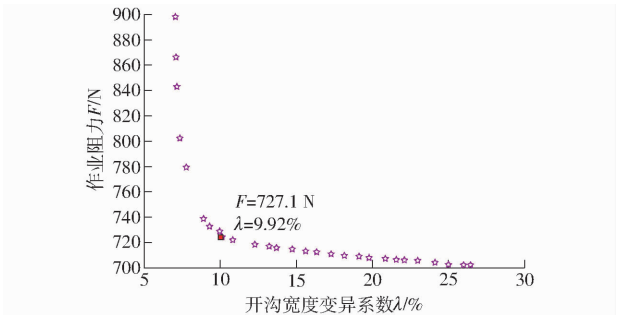


图 8 基于 NSGA-II 算法的 Pareto 最优解曲线

Fig. 8 Curve of Pareto optimal solutions of algorithm based on NSGA-II

5 验证试验

5.1 土槽验证试验

为了进一步验证开沟器离散元仿真模型和仿真参数的可靠性,如图 9 所示,采用土槽试验进行验证,以作业阻力和种沟宽度变异系数为响应指标,以最优参数组合:播深为 41 mm,入土角为 24°,开沟器宽度为 107 mm 进行 5 组重复试验。试验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

点实验室的土槽试验台进行。试验设备包括坑式土槽,速度为 0.15~14 km 的自走式台车(无级调节);六分力测力装置;铁牛-55 型全套液压悬挂装置;以 PaC 为核心的数据实时采集、处理、存储等运行及控制柜。土槽内类砂土壤的含水率为 13%,土壤平均紧实度为 165 kPa。



图 9 土槽验证试验

Fig. 9 Soil bin verification test

表 5 为以最优参数组合进行试验得到的实测值。由表可知,作业阻力的平均值为 789.07 N,种沟宽度变异系数平均值为 10.69%,与优化结果的误差分别为 8.52%、7.76%,表明经仿真得到的参数组合和优化结果可信。

表 5 土槽验证试验结果

Tab. 5 Soil bin verification test results

试验指标	试验序号					平均值
	1	2	3	4	5	
作业阻力/N	794.65	800.46	778.31	787.49	783.96	789.07
种沟宽度变						
异系数/%	9.58	12.43	11.75	10.37	9.32	10.69

5.2 播种对比试验

2018 年、2019 年分别于内蒙古自治区乌兰察布市开展田间播种对比试验,试验配套动力为雷沃 454 型拖拉机,试验装置为宽苗带播种开沟器、传统播种机开沟器 6 行播种;行距为 25 cm。土壤

类型为砂壤土,0~20 cm 耕作层土壤的相对含水率为14.3%,试验燕麦品种为白燕2号、坝苽1号。播种现场如图10所示,燕麦出苗效果对比如图11所示。



图10 播种试验
Fig.10 Seeding test



(a) 传统播种 (b) 宽幅条播

图11 燕麦出苗对比

Fig.11 Comparison of emergence of oat

开沟器的作业性能直接影响种子的出苗率(有效株数)和作物的产量,将有效苗数和千粒质量等实测数据与理论测产方式对比,可表明开沟器的作业效果。

采用随机区分设计,宽幅条播机机械播种和传统机械播种各处理0.67 hm²,播种量为每平方米600粒有效种子。试验结果如表6所示。

由表6可知,两种播种模式下,燕麦的有效苗数均无明显差异,但传统机械播种模式下,燕麦各样点间的出苗数差别较大,对产量有较大影响。而使用本文设计开沟器的宽幅条播种植模式下,各测试点

表6 基本苗数和产量试验结果

Tab.6 Basic seedling count and yield survey

处理方式	基本苗数				单产/ (kg·m ⁻²)	增产/ kg	增幅/ %
	I	II	III	平均			
宽幅条播	310	311	295	305	0.24	0.03	14.3
传统机播	321	310	283	305	0.21		

的出苗数差别较小,燕麦产量增幅为14.3%。

综合土槽试验和田间播种对比试验可知,本文设计的开沟器能够实现燕麦的宽苗带播种。

6 结论

(1)为适应燕麦在砂壤土条件下的宽苗带机械化种植,设计了一种新型开沟器,确定了开沟器滑切曲线类型和挡土曲面参数。通过滑切部分、挡土板、分种板的配合作用,使种子能以相同的播深,相对均匀分布在种沟两侧。

(2)通过三元二次正交旋转试验得出开沟器宽度、入土角、播深与种沟宽度变异系数、作业阻力的回归方程。双因素响应曲面图分析表明,入土角和播深对作业阻力影响较大,入土角对种沟宽度变异系数的影响较小。

(3)基于NSGA-II算法得到最佳组合参数:播深为41 mm、入土角为24°、开沟器宽度为107 mm,此时作业阻力为727.1 N,种沟宽度变异系数为9.92%;土槽验证试验得到作业阻力的平均值为789.07 N,种沟宽度变异系数平均值为10.69%,与优化结果的误差分别为8.52%、7.76%。

(4)田间播种对比试验表明,安装开沟器的宽幅条播种植作业效果较好,各个测试点的出苗数差别较小,燕麦产量增幅为14.3%,作业效果满足燕麦宽苗带种植开沟农艺要求。

参 考 文 献

[1] 张莹,陈志飞,张晓娜,等.不同刈割期对春播秋播燕麦干草量和品质的影响[J].草业学报,2016,25(11):124-135.
ZHANG Ying, CHEN Zhifei, ZHANG Xiaona, et al. Effects of different mowing stages on hay quantity and quality of oat in spring and autumn [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016,25(11): 124-135. (in Chinese)

[2] 柳茜,孙启忠,杨万春,等.攀西地区冬闲田种植晚熟型燕麦的最佳刈割期研究[J].中国奶牛,2019(1):4-7.
LIU Qian, SUN Qizhong, YANG Wanchun, et al. Study on the optimal mowing period of late-ripening oat cultivated in idle fields in winter in Panxi region [J]. Chinese Dairy Cow, 2019(1):4-7. (in Chinese)

[3] OTHMAN R A, MOGHADASIAN M H, JONES P J. Cholesterol-lowering effects of oat beta-glucan [J]. Nutrition Reviews, 2011,69(6): 299-309.

[4] RASANE P, JHA A, SABIKHI L, et al. Nutritional advantages of oats and opportunities for its processing as valueadded foods—a review[J]. Food Technol.,2015,52: 662-675.

[5] 苏日娜.中国燕麦产业发展研究——以内蒙古为例[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.
SU Rina. Research on the development of China's oat industry—a case study of Inner Mongolia [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013. (in Chinese)

[6] 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 test of multifunctional integrated seeding trencher [J]. Transactions of the CSAE,2018,34(11): 58-67. (in Chinese)

[7] 刘宏俊,赵淑红,张先民,等.滑推式开沟器设计与作业性能优化试验[J].农业工程学报,2016,32(19):26-34.
LIU Hongjun, ZHAO Shuhong, ZHANG Xianmin, et al. Design and operation performance optimization test of slide-push trencher [J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(19):26-34. (in Chinese)

- [8] 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 test of profile slide cutter furrow cutters [J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(4):16-24. (in Chinese)
- [9] 吕金庆,衣淑娟,陶桂香,等. 马铃薯播种机分体式滑刀开沟器参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(4):44-54.
LÜ Jinqing, YI Shujuan, TAO Guixiang, et al. Parameter optimization and experiment of splitter sliding-knife opener for potato planter[J]. Transactions of the CASE, 2018,34(4):44-54. (in Chinese)
- [10] 薛惠岚,杨林青,廉登极,等. 双翼深松铲设计参数的试验研究[J]. 西北农业大学学报,1987,15(1):25-29.
XUE Huilan, YANG Linqing, LIAN Dengji, et al. Experimental study on design parameters of double-wing deep loose shovel [J]. Journal of Northwest Agricultural University, 1987,15(1):25-29. (in Chinese)
- [11] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械手册(上)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [12] 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [13] 刘晓鹏,张青松,刘立超,等. 基于微分几何与 EDEM 的船型开畦沟装置触土曲面优化[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(8):59-69.
LIU Xiaopeng, ZHANG Qingsong, LIU Lichao, et al. Surface optimization of ship type ditches based on differential geometry and EDEM simulation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(8):59-69. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190807&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.007. (in Chinese)
- [14] 李刚. 链齿耙式地膜回收机关键机构研究与参数优化[D]. 北京:中国农业大学,2017.
LI Gang. Research on key mechanism and parameter optimization of chain tooth rake plastic film recycling machine [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [15] 郭志军,邢义胜,杜干,等. 触土曲面内蕴几何量对推土板工作阻力的影响[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):328-333.
GUO Zhijun, XING Yisheng, DU Gan, et al. Influence of intrinsic geometrical quantity of soil-engaging surface on working resistance of bulldozing plate [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(2):328-333. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140254&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.054. (in Chinese)
- [16] 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.
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. 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. (in Chinese)
- [17] 西涅科夫 T H,潘诺夫 N M. 土壤耕作机械的理论和计算[M]. 北京:中国农业机械出版社,1995.
- [18] 吉尔 W R,范德伯奇 G E. 牵引和耕作土壤动力学[M]. 北京:中国农业机械出版社,1981.
- [19] 郭志军,杜干,李忠利,等. 触土曲面形式对推土板减阻性能影响的正交试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(7):372-378.
GUO Zhijun, DU Gan, LI Zhongli, et al. Orthogonal experiment on resistance reduction by soil engaging surfaces of bulldozer blade[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(7):372-378. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150753&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.053. (in Chinese)
- [20] 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 profile 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)
- [21] 石林榕,赵武云,孙伟. 基于离散元的西北旱区农田土壤颗粒接触模型和参数标定[J]. 农业工程学报,2017,33(21):181-187.
SHI Linrong, ZHAO Wuyun, SUN Wei. Contact model and parameter calibration of farmland soil particles in northwest arid region based on discrete element [J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(21):181-187. (in Chinese)
- [22] 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)
- [23] 高连兴,郑世妍,陈瑞祥,等. 喂入辊轴流滚筒组合式大豆种子脱粒机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(1):112-118.
GAO Lianxing, ZHENG Shiyan, CHEN Ruixiang, et al. Design and experiment on soybean breeding thresher of double feeding roller and combined threshing cylinder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(1):112-118. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150117&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.017. (in Chinese)
- [24] 王春林,叶剑,曾成,等. 基于 NSGA-II 遗传算法高比转速混流泵多目标优化设计[J]. 农业工程学报,2015,31(18):100-106.
WANG Chunlin, YE Jian, ZENG Cheng, et al. Genetic algorithm based on the NSGA-II high specific speed mixed-flow pump multi-objective optimization design [J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(18):100-106. (in Chinese)
- [25] 杨望,杨坚,贾丰云,等. 种植于红粘土的木薯块根挖掘作业数值模拟[J]. 机械工程学报,2013,49(9):135-143.
YANG Wang, YANG Jian, JIA Fengyun, et al. Numerical simulation of digging operation of cassava root planted in red clay [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013,49(9):135-143. (in Chinese)