



基于响应面法的电控可调节窝眼轮式排种器的优化设计

李晓红¹, 刘晓丽¹, 刘 龙², 屈 哲², 安 雪^{2,3}, 余永昌²

(1. 商丘工学院 机械工程学院, 河南 商丘 476000; 2. 河南农业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450002; 3. 西北农林科技大学 机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为满足大豆小区播种机精密排种的需求,改进一种电控窝眼轮式精密排种器选取传送带速度、落种高度和控制排种器转速的脉冲当量3个影响因素,采用响应面法 Box-Behnken Design (BBD)模型,以合格指数为评价指标进行试验,考察排种器工作过程中不同影响因素间交互作用对排种性能的显著性,并找到电控窝眼轮式排种器最佳工作参数。结果表明:脉冲当量、传送带速度及二者交互作用均对排种性能试验影响显著。通过 BBD 模型获得的排种器最佳工作参数为:脉冲当量为2 848,落种高度为 135. 85 mm,传送带速度为 0. 52 m·s⁻¹,此时的合格指数最大值为 99. 52%。通过试验验证,实际合格指数最大值为 99. 27%,和模型预测值之间的相对误差为 0. 25%,表明该模型拟合度较高,可用于电控可调节窝眼轮式排种器排种性能试验的分析和预测。

关键词:响应面法;窝眼轮式排种器;电控排种;参数优化

Optimum Design and Experimental Analysis of Electronically Controlled Adjustable Hole Seed Metering Device Based on Response Surface Method

LI Xiao-hong¹, LIU Xiao-li¹, LIU Long², QU Zhe², AN Xue^{2,3}, YU Yong-chang²

(1. School of Mechanical Engineering, Shangqiu Institute of Technology, Shangqiu 476000, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to satisfy the requirement of precision soybean seeding with plot seeder, an electronically controlled adjustable hole seed metering device was improved. In this study, three influencing factors were selected, such as speed of the conveyor belt, the height of seeding and the pulse equivalent of the speed with the metering device, and the working process of the seed metering device was evaluated by different influencing factors using the response surface method Box-Behnken Design model. The interaction between the interactions was significant, and the optimal operating parameters of the electronically controlled adjustable hole seed metering device were found. The result showed that the pulse equivalent, the conveyor speed and the interaction between them had significant effects on the seeding performance test. The optimal working parameters of the seed meter obtained by the BBD model were the pulse equivalent in 2 848, drop height at 135. 85 mm and conveyor speed at 0. 52 m·s⁻¹, and the maximum value of the qualified index at this time was 99. 97%. The experimental results showed that the maximum value of the actual qualification index was 99. 73%, and the relative error between the model and the predicted value was 0. 24%. It shows that the model has a high degree of fit and can be used for the analysis and prediction of the performance test of the electronically controlled adjustable eye wheel type seed metering device.

Keywords: Response surface method; Hole wheel type seed metering device; Electronic control seeding; Optimization design

窝眼轮式排种器主要由窝眼轮、排种轴、清种毛刷和护种板等组成,在工作时窝眼轮随着排种轴旋转,种子靠自重滚入旋转的型孔内,经清种毛刷刮去多余的种子后随窝眼轮沿护种板转动到下方后投入种沟^[1]。在传统播种机作业过程中,排种器

转速通常由地轮决定,但当地轮遇到打滑现象时会严重影响播种的作业效果^[2]。故将一种可调节窝眼轮式排种器改进,通过步进电机和单片机控制排种器轴的转动,利用单片机正反转按键完成播种机的清种工作,利用脉冲当量的加减直接控制排种轴

收稿日期:2019-09-18

基金项目:农业部公益性行业科研专项(2013030114)。

第一作者简介:李晓红(1985-),女,硕士,讲师,主要从事农业装备智能控制技术研究。E-mail:294697938@qq.com。

通讯作者:余永昌(1955-),男,学士,教授,主要从事农业装备与机器系统的研究。E-mail:hnyych@163.com。

的转速,使播种机在实际工作当中漏播现象减少,下籽更加均匀,从而达到精密排种的效果,即可以为小区精密播种机的整机设计提供基础^[3-5]。

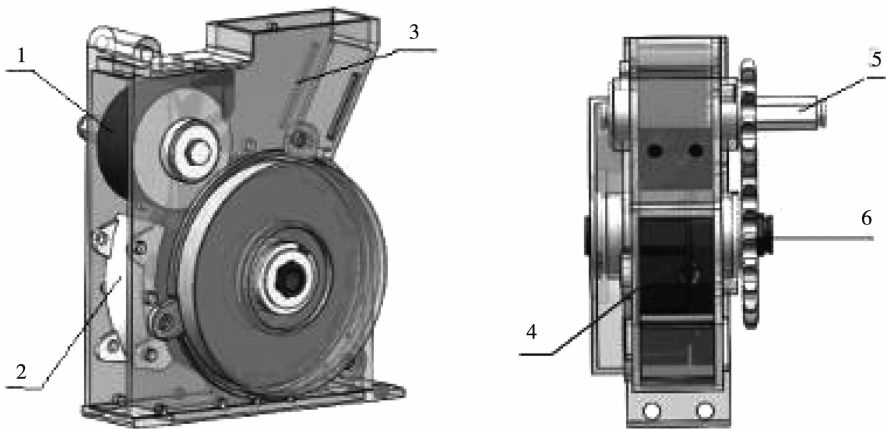
在农业机械的性能试验中采用混合设计建立响应面,研究不同影响因素之间的交互作用。其中,赵佳乐等^[6]以排种器播种吸盘转速、气流运动速度为试验影响因素,漏播率为试验指标进行试验,运用响应面法建立数学模型得到回归方程,最终得出漏播率最小时的气流速度、排种器播种吸盘转速的最佳因素组合。刘艳芬等^[7]运用响应面法对水平圆盘排种器转速、型孔倒角长度和型孔倾角进行多目标优化设计得到最佳参数组合。利用Box-Behnken 设计的响应面分析法对影响因素进行优化以确定最佳水平。赵瑞营等^[8]在采用离散单元法建立不同大小的玉米模型,对高填充率窝眼轮式排种器进行了仿真模拟试验,确定了排种轮转速为 $25\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,窝眼轮圆角半径为 1 mm ,排种轮与种刷和扰动滚筒之间的传动比为 $1:2$ 时排种性能最优,此时粒距合格指数为 98.6% 、重播指数为 0.8% 、漏播指数为 0.6% 、排种综合指数为 98.9% ,试验验证误差 $<5\%$ 。谢伟等^[9]探究了油菜联合播种机所采用的窝眼轮式排种器的排种性能,结果表明,窝眼轮式排种器的转速和种床带行进速度分别为 $24\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $2.2\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,该排种器排种稳定性变异系数和排种均匀性变异系数为最低。

上述研究中所使用的排种器均为机械传动控制,其排种单粒率和排种均匀性有待提高,由于排种器在作业过程中排种轴转速越快,种子的线速度越大,排种器充种工作会受到影响。传送带模拟播种机在田间播种,其行进速度越大,播种的株距也会相应增大,落种高度的增加会使种子在排种管中与管壁之间碰撞的概率增加,进而影响播种株距。本研究针对电控可调节式窝眼轮式排种器进行优化,选取排种轴转速、落种高速和作业机具行驶速度为主要影响因素,研究电控可调节窝眼轮式排种器的性能,用响应面法寻找使排种器作业效果达到最佳的影响因素组合值,为黄淮地区小区播种机的优化改良和当地大豆生产发展提供参考依据。

1 排种器结构及工作原理

1.1 排种器结构

电控可调节窝眼轮式排种器主要结构如图1所示。排种轴与步进电机直接相连,护种板与清种毛刷安装在排种器外壳上,排种器外壳作为固定支架用螺栓直接固定在排种器试验台架上。电控可调节窝眼轮式排种器的动力由控制电机供给,电机通过联轴器与啮合轴和排种轴连接,脉冲发生器控制电机转速,进而决定排种轴转速。转动排种轴外侧齿圈可以调节窝眼的大小,以适应不同粒径的大豆进行播种^[10]。



1:清种毛刷; 2:护种板; 3:壳体; 4:窝眼轮; 5:排种轴; 6:齿轮。
1:Cleaning brush; 2:Seed guard; 3:Shell; 4:socket-roller precision; 5:Seed metering shaft; 6:Gear.

图1 窝眼轮式排种器的结构

Fig. 1 Structure of socket-roller precision seeding device

1.2 工作原理

如图2所示,低压模块直接与交流电连接,将 220 V 的交流电转换成 24 V 直流电,低电压模块一

方面与步进电机驱动器相连,将 24 V 电压输入步进电机驱动器驱动步进电机转动。另一方面通过单片机电路控制步进电机驱动器,由于排种轴与步进

机输出轴直接连接,所以,通过单片机上的脉冲当量加减按键可以实现控制排种轴转速。除此之外,单片机上还设置方向按键,通过电路的设置可以改

变排种轴转向,转向改变后可以将排种器存种装置中剩余的种子清除,从而解决小区播种机清种困难的问题^[11-12]。

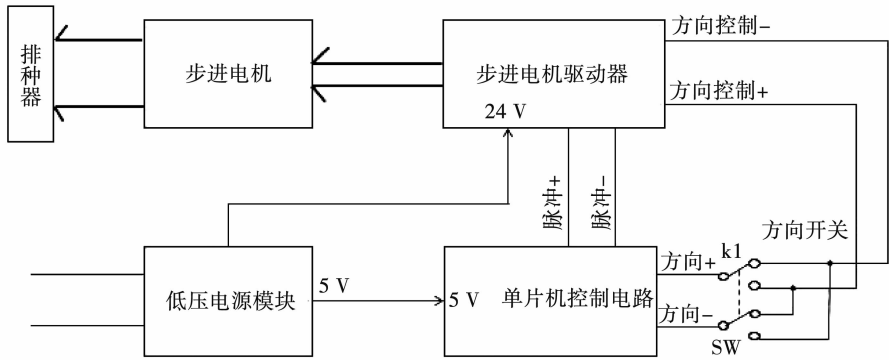


图 2 电控可调节窝眼轮式精密排种器工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the working principle of electronically controlled adjustable eye wheel type precision seed metering device

2 排种性能试验

2.1 材料

选用的大豆品种为适宜于山东南部,河南中东部,江苏淮河以北和安徽淮河以北夏播种植的徐豆 20,该品种大豆的百粒重 24.3 g。

2.2 试验设计

于河南农业大学机电工程学院大豆生产装备试验室对电控可调节窝眼轮式排种器进行排种性能测试,为了选取响应面 BBD 模型优化中合适的影响因素水平,先进行基础单因素试验,单因素试验中以脉冲当量、落种高度、传送带速度 3 个指标为自变量,合格指数为考察目标。单因素试验完成后根据试验结果进行响应面 BBD 模型优化试验,响应面优化试验分别考察脉冲当量、落种高度、传送带速度 3 个因素对电控可调节窝眼轮式排种器排种性能的影响,选取合格指数为考察目标,以期寻求最佳的排种器参数组合,为后期电动小区播种机的设计提供依据。

2.3 方法

单因素试验中分别设定脉冲当量(800,1 600,2 400,3 200,4 000)落种高度(70,100,130,160,190 mm)传送带速度(0.30,0.45,0.60,0.75,0.90 m·s⁻¹) 3 个影响因素。响应面 BBD 模型优化设计试验则根据单因素试验结果对试验水平二次选取,其因素与水平如表 1 所示,借助软件 Design Expert 8.0.6 对试验进行设计。单因素试验和响应面模型优化试验结果均依据单粒(精密)播种机作业质量标

准^[13-14]统计合格指数评判排种器排种性能,5 次重复,取均值作为最终试验结果。

2.4 数据分析

使用 SAS 9.2 对试验数据进行方差多变量分析($P=0.05$);响应面优化模型使用软件 Design Expert 8.0.6。

3 结果与分析

3.1 单因素试验结果与分析

单因素试验结果得到电控可调节窝眼轮式排种器排种性能的最佳脉冲当量为1 600,脉冲当量控制排种轴转速,转速过低时电机输出轴与排种轴之间发生滑移的可能性相对较大从而影响排种的准确性,转速过高会引起排种器轻微抖动,进而影响对播种均匀性造成影响。最佳落种高度为 130 mm,种子下落过程中受到多重因素影响,落种高度过大时种子容易受到风力作用,进而播种均匀性会受到影响,落种高度过低时,台架安装会影响步进电机和排种轴的同轴度,进而影响到播种效果。传送带速度最佳值为 0.60 m·s⁻¹,传送带是用来模拟实际工作过程中播种机的前进,为了使试验更加准确地进行,在试验过程中会将传送带表面涂上液压油层来减小由种子与传送带接触时跳动或滑移而引起的误差,当传送带速度过小时,传送带速度不稳定进而影响播种均匀性,传送带速度过大时油层稀薄,种子滑移和跳动开始加剧^[15-17]。通过单因素优化试验,得到电控可调节窝眼轮式排种器性能试验最佳因素组合值为:落种高度 130 mm,脉冲当量

2 400,传送带速度 0. 60 m·s⁻¹。

3.2 响应面模型优化试验结果与分析

3.2.1 响应面优化试验 根据单因素试验结果进行响应面试验设计,试验因素及具体水平见表 1。

表 1 Box-Behnken 试验因素与水平
Table 1 Factors and levels of Box-Behnken

| 编码 Code | 因素 Factor | 水平 Level | | |
|------------|----------------------------|----------|-------|-------|
| | | - 1 | 0 | + 1 |
| X_1 | 脉冲当量 | 1600 | 2400 | 3200 |
| X_2 | 落种高度/mm | 100 | 130 | 160 |
| X_3 | 传送带速度/(m·s ⁻¹) | 0. 45 | 0. 60 | 0. 75 |

3.2.2 回归模型及相关分析 由表 2 可知,不同因素条件下,排种器排种性能结果差异较大,合格指

表 2 Box-Behnken 试验设计表和结果
Table 2 Design table and results of Box-Behnken

| 编号 No. | 脉冲当量 Pulse equivalent | | 落种高度 Falling height | | 传送带速度 Conveyor speed | | 合格指数 Qualified index | |
|-----------|--------------------------|-------------|------------------------|-------------|------------------------------------|-------------|-------------------------|-----------|
| | 实际值 X_1 | 水平 Level | 实际值 X_2 /mm | 水平 Level | 实际值 X_3 /(m·s ⁻¹) | 水平 Level | 试验值 /% | 拟合值 /% |
| | | | | | | | | |
| 1 | 1600 | - 1 | 130 | 0 | 0. 75 | + 1 | 92. 41 | 92. 41 |
| 2 | 3200 | + 1 | 160 | + 1 | 0. 60 | 0 | 96. 85 | 96. 85 |
| 3 | 3200 | + 1 | 100 | - 1 | 0. 60 | 0 | 96. 28 | 96. 28 |
| 4 | 1600 | - 1 | 130 | 0 | 0. 45 | - 1 | 94. 03 | 94. 03 |
| 5 | 2400 | 0 | 100 | - 1 | 0. 45 | - 1 | 96. 15 | 96. 15 |
| 6 | 2400 | 0 | 130 | 0 | 0. 60 | 0 | 97. 48 | 97. 48 |
| 7 | 3200 | + 1 | 130 | 0 | 0. 45 | - 1 | 97. 39 | 97. 39 |
| 8 | 2400 | 0 | 130 | 0 | 0. 60 | 0 | 97. 48 | 97. 48 |
| 9 | 2400 | 0 | 160 | + 1 | 0. 75 | + 1 | 92. 50 | 92. 50 |
| 10 | 2400 | 0 | 130 | 0 | 0. 60 | 0 | 97. 48 | 97. 48 |
| 11 | 2400 | 0 | 160 | + 1 | 0. 45 | - 1 | 96. 68 | 96. 68 |
| 12 | 3200 | + 1 | 130 | 0 | 0. 75 | + 1 | 93. 05 | 93. 05 |
| 13 | 2400 | 0 | 130 | 0 | 0. 60 | 0 | 97. 48 | 97. 48 |
| 14 | 2400 | 0 | 100 | - 1 | 0. 75 | + 1 | 93. 78 | 93. 78 |
| 15 | 1600 | - 1 | 100 | - 1 | 0. 60 | 0 | 94. 55 | 94. 55 |
| 16 | 2400 | 0 | 130 | 0 | 0. 60 | 0 | 97. 48 | 97. 48 |
| 17 | 1600 | - 1 | 160 | + 1 | 0. 60 | 0 | 93. 94 | 93. 94 |

方差分析结果表明脉冲当量和传送带速度为极显著影响因素($P < 0. 000\ 1$),落种高度为不显著影响因素($P = 0. 105\ 2$),二次模型回归系数的显著

数最低为 92. 41%,最高达到 97. 48%。从结果来看,对电控可调节窝眼轮式排种器影响因素的组合设置很有必要。根据响应面法 Box-Behnken 模型,将各因素经回归拟合后,得到的回归模型如下: $Y = 97. 48 + 1. 08X_1 - 0. 099X_2 - 1. 56X_3 + 0. 29X_1X_2 - 0. 68X_1X_3 - 0. 45X_2X_3 - 1. 32X_1^2 - 0. 76X_2^2 - 1. 94X_3^2$,该回归方程的 $R^2 = 0. 997\ 4$,说明在试验范围内预测值与实测值拟合得很好;模型中的 $P < 0. 000\ 1$,表明该回归模型高度显著;修正决定系数为 0. 994 0,表明此回归方程拟合度较高;模型的 CV 为 0. 16%,说明试验的重复性较好,因此可用此回归方程代替实际试验值对排种器排种合格情况进行分析和预测^[16]。

性检验中 X_1 和 X_2X_1 和 X_3 , X_2 和 X_3 的线性影响均显著, X_{12} 、 X_{22} 和 X_{32} 的曲面效应均显著(表 3)。

表 3 Box-Behnken 试验方差分析
Table 3 Box-Behnken experimental

| 来源 Source | 平方和 Sum of squares | 自由度 df | 均方 Mean square | F 值 F value | P 值 P value |
|--------------|-----------------------|-----------|-------------------|----------------|----------------|
| 模型 Model | 60.100 | 9 | 6.680 | 296.20 | <0.0001 |
| X_1 | 9.330 | 1 | 9.330 | 413.92 | <0.0001 |
| X_2 | 0.078 | 1 | 0.078 | 3.46 | 0.1052 |
| X_3 | 19.560 | 1 | 19.560 | 867.76 | <0.0001 |
| X_1X_2 | 0.350 | 1 | 0.350 | 15.44 | 0.0057 |
| X_1X_3 | 1.850 | 1 | 1.850 | 82.05 | <0.0001 |
| X_2X_3 | 0.820 | 1 | 0.820 | 36.33 | 0.0005 |
| X_1^2 | 7.280 | 1 | 7.280 | 323.10 | <0.0001 |
| X_2^2 | 2.420 | 1 | 2.420 | 107.24 | <0.0001 |
| X_3^2 | 15.890 | 1 | 15.890 | 704.93 | <0.0001 |

3.2.3 不同因素间交互作用的显著性影响 由图 3 可知,脉冲当量和落种高度的二维等高曲线呈椭圆形,说明脉冲当量和落种高度两因素间的交互作

用显著($P = 0.0057$)。由三维等高曲面图可以看出,合格指数随脉冲当量的曲面变化明显,而随落种高度变化的曲面相对平缓。

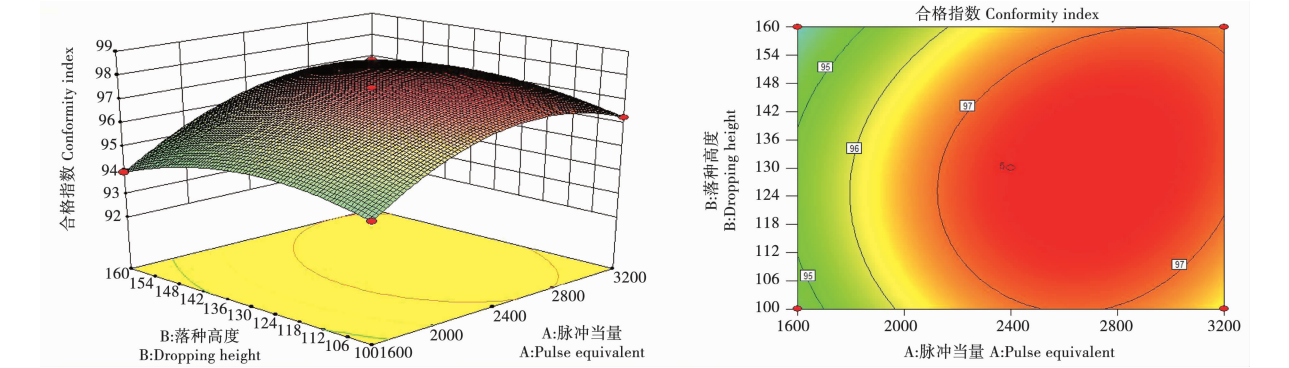


图 3 合格指数随脉冲当量和落种高度变化图

Fig. 3 Figure of the conformity index as a function of pulse equivalent and seed height

由图 4 可知:脉冲当量与传送速度的二维等高曲线呈椭圆形,说明脉冲当量和传送带两因素间的交互作用显著($P < 0.0001$),由三维等高曲面图可

以看出,合格指数随脉冲当量和传送带速度的曲面均呈现出明显的变化趋势。

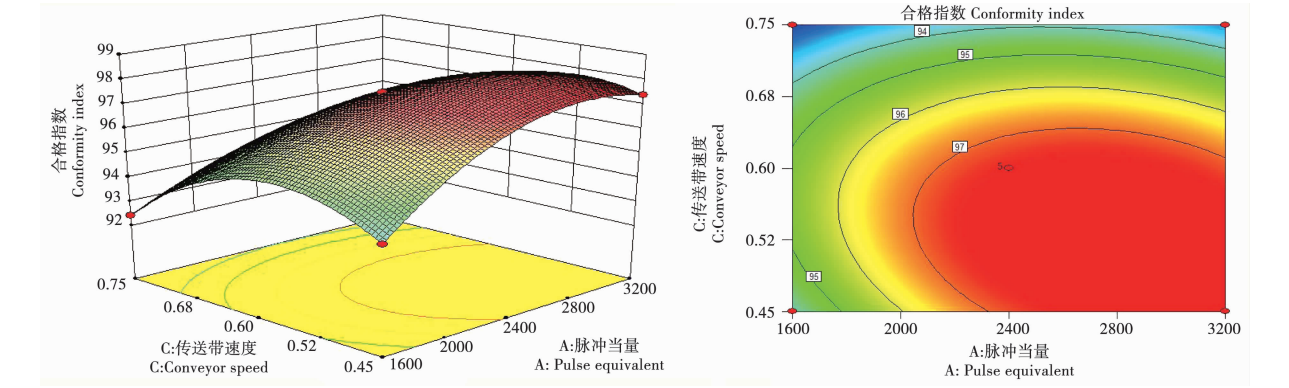


图 4 合格指数随脉冲当量和传送带速度变化图

Fig. 4 Qualification index as a function of pulse equivalent and conveyor speed

由图 5 可知:传送速度和落种高度的二维等高曲线呈椭圆形,说明传送带速度和落种高度两因素间的交互作用显著($P=0.0005$),由三维等高曲面

图可以看出,合格指数随传送带速度变化的曲面变化明显,而随落种高度变化的曲面相对平缓。

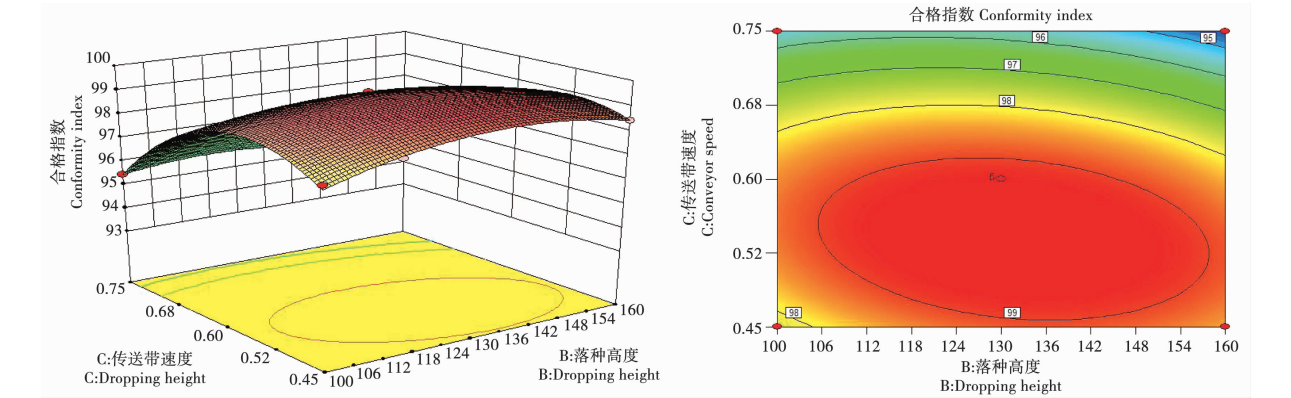


图 5 合格指数随传送带速度和落种高度变化图

Fig. 5 Figure of the conformity index as a function of conveyor speed and seeding height

由响应面 BBD 模型优化得到电控可调节窝眼轮式排种器的排种性能试验最佳参数为:脉冲当量为 2 848,落种高度为 135.85 mm,传送带速度为 $0.52\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,此时合格指数的最大值为 99.52%。

3.3 验证试验

采用上述最佳参数组合验证模型预测值与实际试验值之间的相关性,检验响应面优化模型的可靠性,实际验证试验得到的合格指数为 99.27%,模型预测值与实际试验值之间相对误差仅为 0.25%,说明预测值与试验值相接近,该模型拟合度较高,响应面优化模型的可靠性好。

4 讨论

本研究结果表明相对于落种高度而言,脉冲当量对排种器排种性能的影响较大,当脉冲当量为定值时,合格指数随着落种高度的增大先升高后降低,存在最优值;当落种高度为定值时,合格指数随着脉冲当量的增大先升高后降低,存在最优值。在该试验范围内,脉冲当量和落种高度之间交互作用排种器排种性能影响显著。响应目标合格指数对这两个因素比较敏感,即脉冲当量和传送带速度对排种器排种合格指数的影响均较大。当脉冲当量为定值时,合格指数随着传送带速度的增大先升高后降低,存在最优值;当传送带速度为定值时,合格指数随着脉冲当量的增大先升高后降低,存在最优值。在该试验范围内,脉冲当量和传送带速度的交互作用对排种器排种性能的影响显著。相对于落种高度而言,传送带速度对排种器排种性能的影响更大。当传送带速度为定值时,合格指数随着落种

高度的增大先升高后降低,存在最优值;当落种高度为定值时,合格指数随着传送带速度的增大先升高后降低,存在最优值。在该试验范围内,传送带速度和脉冲当量的交互作用排种器排种性能的影响显著。

本研究利用响应面理论建立响应面模型,得到电控可调节窝眼轮式排种器的结构最优参数,其最优组合为脉冲当量为 2 848,落种高度为 135.85 mm,传送带速度为 $0.52\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,合格指数的最大值为 99.97%。采用上述最佳参数组合进行验证试验,实际验证试验得到的合格指数为 99.73%,模型预测值与实际试验值之间相对误差仅为 0.24%,说明预测值与试验值相接近,该模型拟合度较高,响应面优化模型的可靠性好,可用于电控可调节窝眼轮式排种器的排种性能试验的分析和预测,该结果与赵佳乐^[6]对大豆播种机骗纸双圆盘气吸式排种器中对预测气流速度和吸盘转速的组合模型结果相似,该结果表明该理论模型可以应用于排种器参数优化。本研究中优化后的电控可调节窝眼轮式排种器比原有排种器的充种效果和排种均匀性更好,更适合应用于大豆小区播种机。

5 结论

响应面法 BBD 模型电控对可调节窝眼轮式排种器排种性能的影响分析结果表明:脉冲当量和传送带速度对排种性能试验影响显著,落种高度对排种性能试验影响较小。

脉冲当量和传送带速度的交互作用对排种效果的影响最为显著,传送带速度和落种高度的交互

作用对合格指数的影响次之,脉冲当量和落种高度的交互作用对排种效果的影响较小。

由响应面 BBD 模型优化得到的电控可调节窝眼轮式排种器在传送带速度为 $0.52\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,落种高度为 135.85 mm ,控制排种器转速的脉冲当量为 $2\ 848$ 时排种效果良好,得到合格指数的最大值为 99.52% 。通过试验验证,实际合格指数最大值为 99.27% ,和模型预测值之间的相对误差为 0.25% ,表明该模型拟合度较高,可用于电控可调节窝眼轮式排种器排种性能试验的分析和预测。

参考文献

[1] 李宝筏. 农业机械学[M].北京中国农业出版社,2003. (Li B F. Agricultural machinery [M]. Beijing: China Agricultural Press,2003.)

[2] 张春岭,吴荣,陈黎卿,等. 电控玉米排种系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(2):51-59. (Zhang C L, Wu R, Chen L Q, et al. Design and test of electronic control seeding system for maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 51-59.)

[3] 龚丽农,员玉良,尚书旗,等. 小区播种机电控系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2011,27(5):122-126. (Gong L N, Yuan Y L, Shang A Q, et al. Design and experiment on electronic control system for plot seeder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011,27(5):122-126.)

[4] 金亦富,奚小波,沈函孝,等. 外槽轮电动排种器设计与播种试验[J]. 中国农机化学报,2016,37(10):14-16. (Jin Y F, Xi X B, Shen X H, et al. Design and experiment of electronic external force feed [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016,37(10):14-16.)

[5] 张春岭. 电控玉米排种器的设计与试验[D]. 合肥安徽农业大学,2016. (Zhang C L. Design and test of electronic control seeding system for maize [D]. Hefei: Anhui Agricultural University,2016.)

[6] 赵佳乐,贾洪雷,姜鑫铭,等. 大豆播种机偏置双圆盘气吸式排种器[J]. 农业机械学报,2013,44(8):78-83. (Zhao J L, Jia H L, Jiang X M, et al. Suction type offset double disc seed metering device of soybean seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(8):78-83.)

[7] 刘艳芬,林静,李宝筏,等. 玉米播种机水平圆盘排种器型孔设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(8):37-46. (Liu Y F, Lin J, Li B F, et al. Design and experiment of horizontal disc seed metering device for maize seeder[J]. Transactions of the Chinese

Society of Agricultural Engineering,2017,33(8):37-46.)

[8] 赵瑞营,戴飞,赵武云等. 基于离散单元法的高填充率窝眼轮式精密排种器排种仿真试验[J]. 甘肃农业大学学报,2017,52(1):132-138. (Zhao R L, Dai F, Zhao W Y, et al. Simulation test for nest-eye wheel precision metering device with high fill rate based on the discrete element method[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2017,52(1):132-138.)

[9] 谢伟,刘研. 窝眼轮式油菜排种器性能试验研究[J]. 当代农机,2018(10):67-69. (Xie W, Liu Y. Experimental study on the performance of the wheel-type rapeseed seeding device[J]. Contemporary Farm Machinery, 2018(10):67-69.)

[10] 吴兆迁,才丽华. 可调式窝眼轮排种器结构简图[J]. 林业机械与木工设备,2000,28(2):9-10. (Z Q, Cai L H. Adjustable hole wheel seed meter structure diagram[J]. Forestry and wood-working equipment,2000,28(2):9-10.)

[11] 范超毅,范巍. 步进电机的选型与计算[J]. 机床与液压,2008,36(5):310-313,324. (Fan C Y, Wei W. Selection and calculation of stepping motor[J]. Machine Tool & Hydraulics,2008,36(5):310-313,324)

[12] 王玉琳,王强. 步进电机的速度调节方法[J]. 电机与控制应用,2006,33(1):53-56. (Wang Y L, Wang Q. Method of speed regulation for stepper motor[J]. Electric Machines & Control Application,2006,33(1):53-56.)

[13] NY/T 503-2015. 单粒(精密)播种机作业质量[S]. 北京中华人民共和国农业部,2015. NY/T 503-2015. Working quality of single (precision) seeder[S]. Beijing The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China,2015.

[14] 沈其君. SAS 统计分析[M]. 南京东南大学出版社 2009. (Shen Q J. SAS statistical analysis[M]. Nanjing Southeast University Press,2009.)

[15] Li Z Q, Yu J Q, Feng Z R, et al. Simulation and performance analysis of a soybean seed metering device using discrete element method[J]. Sensor Letters: A Journal Dedicated to all Aspects of Sensors in Science, Engineering, and Medicine,2013,11(6/7):1217-1222.

[16] Anantachar M, Kumar P G V, Guruswamy T, et al. Neural network prediction of performance parameters of an inclined plate seed metering device and its reverse mapping for the determination of optimum design and operational parameters[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2010,72(2):87-98.

[17] 刘佳,崔涛,张东兴,等. 机械气力组合式玉米精密排种器[J]. 农业机械学报,2012,43(2):43-47. (Liu J, Cui T, Zhang D X, et al. Mechanical-pneumatic combined corn precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(2):43-47.)