

基于 EBF 神经网络模型的喷雾机吊喷分禾器参数优化

崔龙飞^{1,2} 薛新宇¹ 秦维彩^{1,2}

(1. 农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 江苏大学农业工程研究院, 镇江 212013)

摘要: 喷杆-吊杆组合式喷雾机被广泛应用于棉花催熟脱叶剂的喷施, 由于棉花采用密植栽培模式, 棉花冠层中下部脱叶剂喷施覆盖率低, 脱叶效果差, 严重影响了机采棉品质。为提高棉花中下部的喷洒覆盖率, 减小喷雾机行驶阻力, 提出吊杆分禾器参数优化方案, 采用 Box - Behnken 设计制定试验方案, 以分禾器前倾角、安装高度、作业速度等参数作为试验因素, 通过田间试验获取雾滴覆盖率、分禾阻力等响应数据, 使用椭球基神经网络 (Ellipsoidal basis function neural network, EBFNN) 逼近响应和试验因素之间的关系, 建立精度可靠的近似模型, 基于该模型对试验因素分析、优化。并得到最佳试验参数组合: 分禾器离地高度 210 mm、分禾器前倾角 12°、喷雾机作业速度 4 km/h。在此条件下进行田间试验, 棉花冠层平均雾滴覆盖率为 22.49%, 与模型预测值相比误差为 10.89%; 分禾阻力试验均方根为 70.9 N, 与模型预测值相比误差为 7.78%。

关键词: 棉花脱叶剂; 喷雾机; 分禾器; 近似模型; 优化

中图分类号: S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0062-08

Parameter Optimization on Crop Divider of Cotton Defoliation
Sprayer Based on EBFNN

Cui Longfei^{1,2} Xue Xinyu¹ Qin Weicai^{1,2}

(1. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China

2. Institute of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Xinjiang is one of the most important high-quality cotton production areas in China, and sprayers with horizontal boom and hang boom are widely used in ripening and defoliation of the cotton. Due to the close planting cultivation of cotton, in the lower part of the cotton canopy, the spraying coverage of the defoliant is low and defoliation effect is poor, which seriously affects the cotton quality. In order to improve the spraying coverage rate of the defoliant in the middle and lower cotton, a scheme for optimizing the parameters of the divider was put forward, and it was designed and developed by using Box - Behnken. The parameters, such as top rake of the crop divider, ground clearance, field speeds were taken as the influencing factors, and spray coverage and resistance of crop divider were used as test indices in the experimental study, obtaining the test indices though field test with test equipment designed. By using the ellipsoidal basis function neural network (EBFNN) the relationship between the indices and test factors was approached, then accurate and reliable approximation model was established. Then the multi-objective genetic algorithm was used to optimize the coverage rate and resistance of crop divider based on this approximate model in Isight software platform, the optimal parameters combination was obtained through determining the weight coefficient of the optimized solution set. Best combination of test parameters were listed below: ground clearance of the crop divider was 210 mm, the top rake of the crop divider was 12°, and the operation speed of the sprayer was 4 km/h. Field experiments were carried

收稿日期: 2015-10-23 修回日期: 2015-11-20

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201203025)和农业部 948 引进重点项目(2011-G10(4))

作者简介: 崔龙飞(1989—), 男, 研究实习员, 江苏大学博士生, 主要从事现代设计理论与方法研究, E-mail: cuilong_fei@163.com

通信作者: 薛新宇(1969—), 女, 研究员, 博士, 主要从事植保工程技术研究, E-mail: 735178312@qq.com

out under this condition, the results show that the average droplet coverage on cotton canopy was 22.49%, compared with the model prediction, the error range was less than 10.89%, and the root mean square value of grain resistance test was 70.9 N, the error range was less than 7.78%. It can provide a reference for cotton crop divider design and spraying parameters optimization of boom sprayer, and also greatly promote the progress of cotton defoliation harvesting mechanization.

Key words: cotton defoliation; sprayer; crop divider; approximate model; optimization

引言

新疆是我国重要的优质棉花生产区,种植面积 160 多万 hm^2 ,多采用密植方式,种植密度是美国等国家的 2 倍以上^[1-3]。喷洒脱叶剂是棉花机械化收获的重要环节,可以提高产量和降低含杂率^[4-5]。喷杆喷雾机被广泛应用于棉花脱叶剂的喷施,充分均匀的喷洒能提高脱叶品质,进而降低棉花的含杂率,对提高棉花品质具有重要意义^[6]。由于现行种植多采用密集化方式,棉花叶片交叉、重叠严重,植株下部叶片不能及时脱落导致整体脱叶率低、含杂率高^[7-10]。如何提高雾滴在棉花中下层的覆盖率,改进施药机械、优化作业参数是关键^[11-13]。新疆建设兵团用于棉花脱叶剂喷施的喷杆式喷雾机保有量一千余台,对喷雾机械进行改装,增设吊杆和分禾器,竖直向下的吊杆上安装了 1 组喷头或 2 组喷头,从棉行间进行侧面喷洒提高了脱叶剂在棉花中下层叶片的附着率,改善了喷雾效果^[14-17]。分禾器的安装带来了一系列问题,比如,喷雾机田间作业增加了行驶阻力,分禾面会推倒棉花植株或者刮落棉桃。分禾器安装不合理的话,不但不能起到分禾作用,吊喷也无法达到优化沉积分布的效果^[18-19]。

本文以常用吊杆式喷雾机为研究对象,通过调节分禾器的离地高度、前倾角和作业速度等参数,采用 Box - Behnken 设计方案^[20],通过田间试验获取雾滴覆盖率、分禾阻力等响应数据,使用椭球基神经网络 (EBFNN) 逼近响应和试验因素之间的函数关系,建立精度可靠的近似模型,以期获得吊杆式喷雾机分禾器安装参数与作业速度的最佳匹配,为进一步提高棉花脱叶剂喷施技术提供依据与参考。

1 分禾器结构及作用

大型喷杆喷雾机喷头通常都分布于喷杆桁架上,在喷洒脱叶剂时普遍存在棉花中、下部喷洒不到位,不均匀,棉花脱叶不干净、不彻底,直接影响到种植户籽棉交售价格,企业籽棉加工质量和效益。新疆建设兵团对所有的喷杆喷雾机加装了吊喷及分禾器。分禾器主要由分禾面、筋板、固连装置等组成,吊杆连接在桁架上,分禾器固连在吊杆上。吊喷、分

禾器结构如图 1 所示。

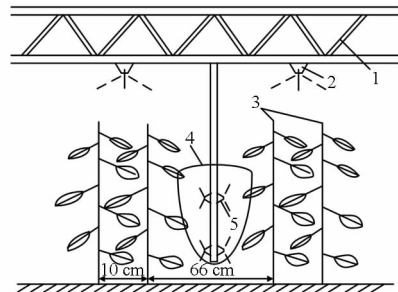


图 1 吊喷、分禾器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of crop divider and hang spray

1. 喷杆 2. 横喷头 3. 棉花 4. 分禾器 5. 吊喷

分禾器虽然结构简单,却对脱叶剂的沉积、分布影响很大。其作用主要有以下几点:①分禾器在行间通过时,将棉花枝条分开,使脱叶剂能够均匀地喷洒到棉花中下层。②分禾器具有较好扶禾的能力,将一些倒伏的棉花扶正。③分禾器能够保护好防滴漏喷头,使其不被枝条阻塞或损坏。

2 材料与方法

2.1 试验设备与环境条件

本次试验喷雾机选用新疆建设兵团主推的悬挂式喷杆喷雾机,喷幅 16 m,喷杆由横喷杆和吊喷杆组成,共装有 108 个喷头,吊杆在横喷杆下面平行地垂吊着 22 根竖喷杆,横喷杆上喷头间隔 76 cm,吊杆间隔 76 cm,每根吊杆上有 2 层共 4 个喷头,左右喷头扇面夹角 90°,扇面与地面垂直(图 1 和图 2),2 层喷头距离地面分别为 25 cm、50 cm。分禾器面全部为塑料模具注塑成型。试验分禾器与吊杆的连接通过改装,可以调节分禾器的前倾角、安装高度。喷嘴为苏州蓝翱精密塑胶有限公司生产,型号为 N. Lanao/F11002,压力在 0.2 ~ 0.4 MPa 范围内,流量变化范围 0.653 ~ 0.924 L/min,喷雾角 110°。为了减少试验误差,保证机具行走的稳定性,选取田块没有沟、垄,地面相对平整的地段进行试验。试验喷雾机作业时行驶速度 4 ~ 8 km/h,车速通过安装于后轮的光电编码器来测量,喷雾机安装了分配阀,保证喷杆各段压力、流量一致,每公顷地施药量 360 ~ 930 L 可调节,试验时每公顷地规定脱叶剂溶液喷施量为 600 L。



图2 试验喷雾机及分禾器

Fig. 2 Boom sprayer and crop divider used for test

本次试验研究在新疆昌吉州 105 团连队农场进行,棉花品种为新陆早 48 号,株高 90 ~ 100 cm,采用 66 cm + 10 cm 宽窄行交替栽培模式,种植密度 1.65×10^5 株/hm²。为了降低叶面积指数对雾滴覆盖率的影响,在试验之前,选取株高和长势相对均匀、面积约为 40 m × 200 m 的地块作为试验处理区。

试验用数字温湿度表(深圳市万仪通仪器仪表)和 GM8901 型风速测量仪(深圳市万仪通仪器仪表),HP-500 型数显式推拉力计(艾德堡仪器),辅助工具量角仪、卷尺。测量并记录 10:00—19:00 的温度、湿度和风速,温度最高为 37.8℃,最低为 25.5℃,平均为 30.56℃;湿度最高为 47.7%,最低为 23%,平均为 30.92%。风速最高为 2.5 m/s,最低为 0 m/s,平均为 1.4 m/s。

2.2 试验参数与方法

2.2.1 分禾阻力测量

由于新疆棉花普遍采用 66 cm + 10 cm 宽窄行交替栽培模式,棉花枝叶层层交叉在一起,有的已经木质化,22 个分禾器在行间穿行阻力非常大,作用于喷杆桁架上的力和力矩会使喷杆发生变形或者破坏,同时大大增加了拖拉机的功耗,因此将分禾面上的阻力作为一项评价指标。

分禾阻力测试装置原理图如图 3 所示,可以通过调节连接方管上的螺钉,调节分禾器的高度,转接头可以绕杆上的铰接孔转动,滑动座上的 L 型圆钢与转接头通过圆柱副连接,滑座可以自由滑动,通过拧紧螺钉进行定位。滑座上安装测力仪。试验装置满足以下要求:分禾器前倾角度可调、位置高度可调。测力仪通过 4 个内六角螺钉固定于滑座下底板,测力仪的触头始终垂直于分禾器面,通过调节滑座位置,实现分禾器前倾角的调节。在试验过程中,将图 3 所示的测力装置安装于喷杆桁架上,替换原来的吊杆分禾器。通过测力计记录受力曲线,求取均方根。

2.2.2 雾滴的沉积分布测量

增加棉花下层的脱叶剂的覆盖率,有利于催熟脱叶,将雾滴覆盖率作为评价指标。测量雾滴的沉

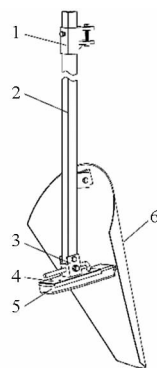


图3 分禾器阻力测量装置

Fig. 3 Resistance measuring device for crop divider

1. 连接方管 2. 竖杆 3. 转接头 4. 滑动座 5. 测力仪 6. 分禾器

积分分布采用图像处理方法,为了保证每次取样的一致性,将 3 层水敏纸分别固定在标杆上离地 70、45、20 cm 的位置,然后将标杆插入行距为 10 cm 的 2 行棉花中间,沿施药机具行驶方向,共设置 10 个采样点,各采样点间隔 1 m,每个处理重复 3 次。为了使喷洒更加稳定,施药机具在距离喷洒区 10 m 处启动,打开喷雾装置,匀速通过喷洒区,在离开喷洒区 5 m 时停止喷洒。每次喷雾试验后,等水敏纸上的雾滴晾干后,用镊子或带防水手套收取,并做好标记,放入自封袋,带回实验室进行分析。

雾滴沉积状态参数为雾滴覆盖率和雾滴分布均匀性^[21]。雾滴覆盖率通过图像中分析区域雾滴的像素数与分析区域像素数之比求得,其计算公式为

$$\delta = \frac{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N f(i,j)}{MN} \times 100\% \quad (1)$$

式中 M 、 N 为分析区域的宽度和高度,像素 $f(i,j)$ 为图像分析区域中像素相对坐标为 (i,j) 的像素灰度标志,若像素为黑色,则 $f(i,j) = 1$; 否则 $f(i,j) = 0$ 。

2.2.3 试验设计

为了保证多次重复采样数据可比性,选择同一连队种植模式相同、棉花整体长势相同的田块作为试验田。考虑到同一地块进行不同参数重复试验时,则前后 2 次分禾状态是不同的,势必造成分禾阻力的不同,因此,将整块试验田沿喷雾机前进方向划分出 10 m 等长度试验区,每块试验区间隔 15 m,便于重新调整试验参数,准备下次试验,在脱叶剂喷施作业同时进行试验,也便于后期观察不同试验参数组合下的棉花脱叶情况。

在喷杆喷雾机工作过程中,分禾器应将棉花植株分开,将脱叶剂均匀喷洒到植株叶片上,还需使分禾器受到的阻力最小,以提高通过性。采用 Box-Behnken 试验设计方案,该设计方法属于不完全的三水平析因设计,与中心复合设计不同的是它不需

要连续进行多次试验,常用于复杂非线性问题研究。将雾滴覆盖率、分禾器所受阻力作为评价指标,对图 4 中所示的分禾器前倾角 θ 、分禾器尖端离地高度 h 、作业速度 v 等因素展开试验研究,试验因素、水平如表 1 所示。

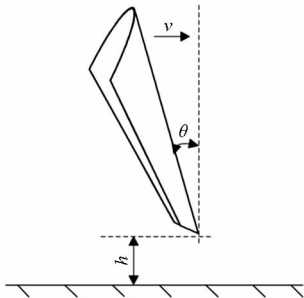


图 4 分禾器试验参数
Fig. 4 Test parameters of crop divider

表 1 试验因素与水平
Tab. 1 Test factors and levels

试验 水平	因素		
	前倾角 $x_1/(^{\circ})$	离地高度 x_2/mm	作业速度 $x_3/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$
1	10	150	4
2	15	200	6
3	20	250	8

3 试验数据处理与分析

3.1 试验结果

采用 Box – Behnken 设计方案,根据试验因素和水平进行试验,采集试验数据并进行处理,对每根标杆上不同高度测得的雾滴覆盖率求取平均值,作为采样点覆盖率评价指标。将测得的阻力取均方根作为阻力的评价指标,得到试验结果如表 2 所示。试验数据是重复 3 次取平均值。

3.2 近似模型建立与误差分析

近似模型 (Approximation models) 是通过数学模型的方法逼近一组输入变量与响应变量的方法^[22]。根据逼近函数形式的不同,建模方法主要分为多项式回归法、神经网络法、Kriging 函数法和径向基函数法,从拟合精度和拟合效率比较,高斯径向基函数的响应面建模方法既具有较广的适用范围,也具有较高的模型拟合效率,最适于实际问题的响应面建模^[23-24]。常用的近似模型有多项式响应面模型、Kriging 模型、径向基神经网络 (RBFNN) 模型及椭球基神经网络模型 (EBFNN) 等^[22]。

神经网络的内部构造是由输入层、隐层和输出层组建的 3 层前馈网络,其中输入层主要负责接收输入变量,隐层负责对输入变量进行非线性变换,输出层负责输出变量,网络的最终输出是由几个隐节

表 2 试验设计与结果

Tab. 2 Experiment design and results

试验 号	试验因素			雾滴覆盖 率 $Y_1/\%$	分禾阻力均 方根 Y_2/N
	前倾角 $x_1/(^{\circ})$	离地高度 x_2/mm	作业速度 $x_3/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$		
1	20	200	8	12.48	77.2
2	15	200	6	9.27	67.7
3	15	150	4	24.91	84.7
4	15	150	8	16.85	94.7
5	20	150	6	24.76	78.3
6	15	250	8	6.97	70.1
7	10	200	4	25.06	74.3
8	15	200	6	9.27	67.7
9	15	200	6	8.73	66.4
10	20	250	6	7.64	56.3
11	10	200	8	16.91	85.7
12	10	150	6	32.31	89.6
13	10	250	6	12.36	68.3
14	20	200	4	20.61	65.1
15	15	250	4	15.74	58.2
16	15	200	6	65.90	8.91

点的线性加权和得到的^[25]。
插值问题实质上是寻找满足 $y_i = F(x_i)$ 的函数, 设 $\boldsymbol{X} = (x_i, \cdots, x_M) \in \Omega \subset \mathbf{R}^n$, 是一组输入变量, 神经网络数学表达式为

$$F(\boldsymbol{X}) = \sum_{j=1}^N \alpha_j g_j(\boldsymbol{X}) + \alpha_{N+1} \tag{2}$$

式中 N ——隐节点数目
 α_j ——隐节点对应的一组输出权值
 α_{N+1} ——未知偏差值
 $g_j(\boldsymbol{X})$ ——一组任意的基函数, 一般采用高斯函数作为基函数^[26]

神经网络模型主要有径向基神经网络和椭球基神经网络, 将生物神经元“内抑制外兴奋”原理和函数逼近理论的结合, 对于复杂非线性函数有极强的逼近能力。EBFNN 模型与 RBFNN 模型结构相似, 含有隐层的 3 层前馈神经网络, 可以看作是 RBFNN 模型的扩展, 使用全协方差矩阵代替径向基神经网络中的对角型协方差矩阵, 显著提高了网络分类能力。EBFNN 模型以样本点与隐节点中心之间的 Mahalanobis 距离作为自变量, 依然以高斯函数作为基函数, 其表达式为^[27]

$$g_j(\boldsymbol{X}) = \exp \left(-\frac{1}{2} (\boldsymbol{X} - \boldsymbol{c}_j)^T \boldsymbol{S}_j^{-1} (\boldsymbol{X} - \boldsymbol{c}_j) \right) \tag{3}$$

($j = 1, 2, \cdots, N$)

其中 $\boldsymbol{S}_j \approx \hat{\boldsymbol{S}}_j = \frac{1}{N_j} \sum (\boldsymbol{X} - \boldsymbol{c}_j)(\boldsymbol{X} - \boldsymbol{c}_j)^T$ (4)

式中 $\boldsymbol{c}_j$ ——隐节点中心值
 $\boldsymbol{S}_j$ ——全协方差矩阵, 近似等于样本方差

将表 2 中的试验数据输入多学科优化软件 Isight 中,分别构建二次多项式响应面近似模型、Kriging 近似模型以及 EBF 神经网络近似模型,并对其拟合误差进行评估,Isight 中误差精度的评估方法有:均值误差 (Average)、均方根差 (Root mean square)、决定系数(R^2)等,3 种方法误差见表 3。

表 3 3 种近似模型拟合精度比较

Tab.3 Three approximation model fitting accuracy comparison					
建模方法	响应	均值误差	最大误差	均方根差	决定系数
RSM(二阶)	Y_1	0.069 43	0.184 46	0.090 10	0.925 45
	Y_2	0.110 00	0.238 36	0.132 42	0.800 39
Kriging 法	Y_1	0.158 07	0.326 14	0.185 25	0.893 69
	Y_2	0.047 09	0.125 45	0.054 25	0.957 48
EBF 法	Y_1	0.050 61	0.141 48	0.069 16	0.957 63
	Y_2	0.036 29	0.095 8	0.046 86	0.971 95

对于该分禾器参数优化问题,表 3 中 3 种近似模型误差分析可知,使用椭球基函数近似模型预测精度最好,Kriging 模型稍差,二次响应面近似模型

精度最差。
喷雾覆盖率 Y_1 、分禾阻力 Y_2 的 EBFNN 模型决定系数 R^2 分别为 0.957 63、0.971 95,表明 95% 以上的响应值均可以由 EBFNN 模型解释。分禾阻力和喷雾覆盖率两目标的误差精度如图 5 所示,预测值与真实值都在斜线附近,表明预测值、真实值非常接近。综上,椭球基神经网络函数最适于分禾器问题的响应面建模,可以进行分禾器工作参数的预测、分析与优化。

3.3 因素影响规律解析

根据构建的椭球基神经网络近似模型,绘制出试验因素分禾器前倾角 x_1 、离地高度 x_2 、作业速度 x_3 对脱叶剂喷雾覆盖率 Y_1 及分禾阻力 Y_2 响应曲面(图 6、7)。从图 6 可以看出,随着分禾器离地高度、作业速度的减小,喷雾覆盖率 Y_1 逐渐增大,当分禾器前倾角逐渐减小过程中,喷雾覆盖率先是缓慢减小然后再迅速增大,前倾角在 $15.2^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 范围内覆盖率变化较小。

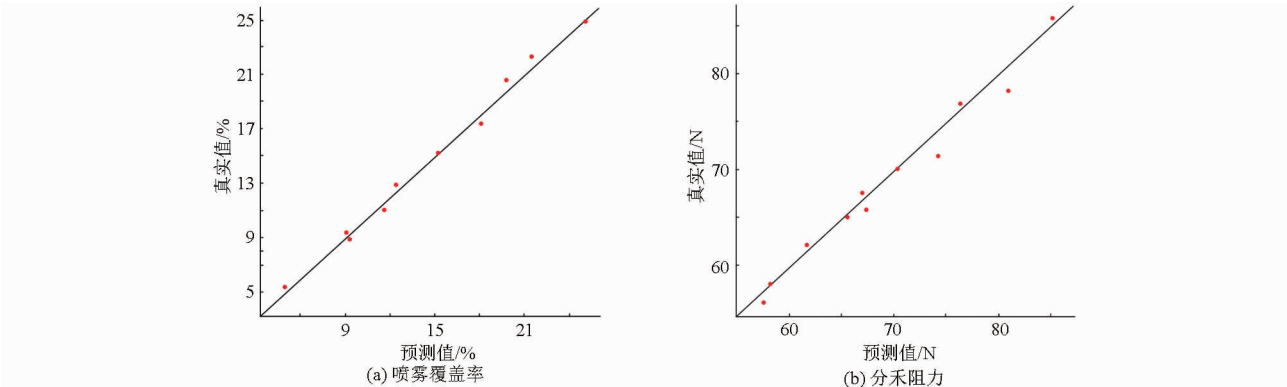


图 5 近似模型的目标误差精度统计图
Fig.5 Target error accuracy statistics of approximation model

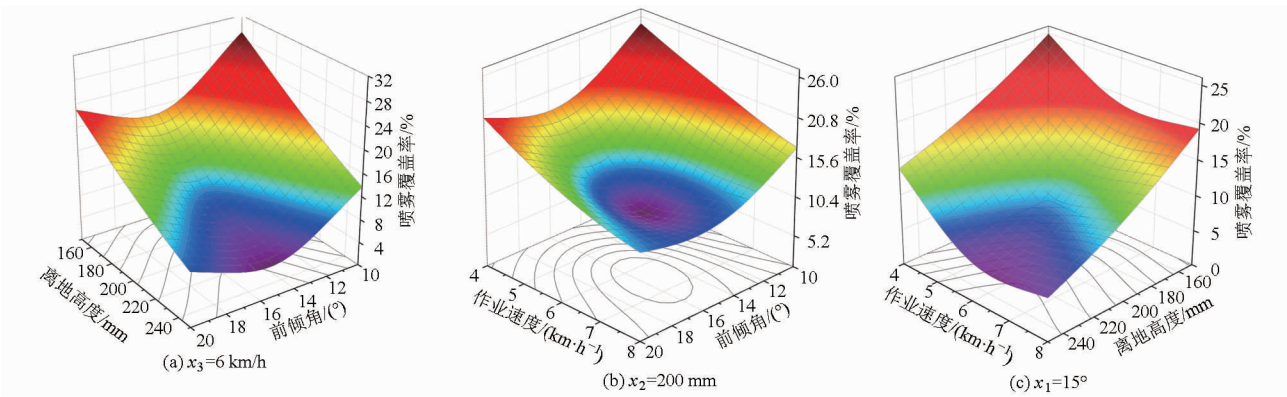


图 6 试验因素对喷雾覆盖率的影响
Fig.6 Influence of test factors on spray coverage

主要原因是:分禾器离地高度增加,下层棉花枝叶未被分开,吊喷没能将脱叶剂喷洒到位,导致喷雾覆盖率降低;作业速度增加时,路面激励、棉花阻力引起的喷杆摆动随之增大,棉花叶片的覆盖率降低;

前倾角增大,会使分禾器面与吊杆上喷头之间的距离增大,棉花枝条被分开后又迅速合上,脱叶剂未能均匀喷洒开来,导致喷雾覆盖率下降。
图 7 为试验因素对分禾阻力的影响,从图 7 可

以看出,随着作业速度的增加,分禾阻力逐渐增大,随着分禾器离地高度增加,分禾阻力逐渐减小,分禾器前倾角增大过程中,阻力变化比较缓慢,总体呈减小趋势。作业速度和离地高度对阻力的影响比较大。

主要原因是:分禾器安装高度增加,分禾器与木

质化的枝条接触部分减少,阻力随之减小;当作业速度增加时,交叉枝叶的被迅速分离,会使枝条打结或者缠绕,导致分禾阻力增加;分禾器前倾角越小,分禾面垂直于前进方向投影面积越大,与棉花正面接触面积增大,阻力也越大,甚至会将植株推倒。

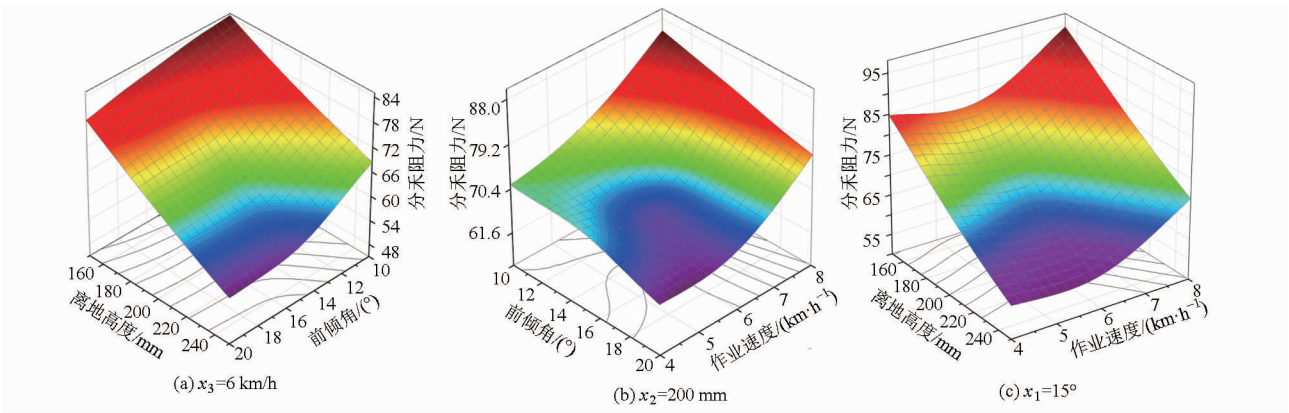


图7 试验因素对分禾阻力的影响
Fig.7 Influence of test factor on resistance of crop divider

4 模型优化与验证

为了提高新疆棉花品质,降低机采棉含杂率,应该提高棉花植株中下部脱叶剂雾滴覆盖率;分禾器、吊杆的安装给喷杆增加了很大负载,也给拖拉机带来很大行驶阻力,减小分禾器受到的阻力,对于提高喷雾机通过性,防止喷杆桁架结构屈服变形至关重要。分禾器参数的优化目标即提高雾滴覆盖率、减小分禾器所受阻力。由于各因素对目标的影响各不一致,需要进行全局多目标优化。

4.1 数学模型

以脱叶剂喷雾覆盖率 Y_1 及分禾阻力 Y_2 为优化目标,以分禾器前倾角 x_1 、离地高度 x_2 、作业速度 x_3 为设计变量,优化数学模型可以描述为

$$\begin{cases} \max Y_1 = f_1(x_1, x_2, x_3) \\ \min Y_2 = f_2(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t. } x_1 \in (10, 20) \\ \quad \quad x_2 \in (150, 250) \\ \quad \quad x_3 \in (4, 8) \end{cases} \quad (5)$$

4.2 优化与验证

在多学科优化设计平台 Isight 环境中,调用优化设计组件,定义设计变量和优化目标,对构建的EBFNN 近似模型进行多目标优化求解,采用的优化方法为 NCGA 多目标遗传算法。NCGA 算法在进行交叉的时候,不是在具有完全不同的遗传因子信息的个体之间进行,而是在在具有一定程度的类似体的个体之间进行的,这种邻域交叉的方法容易在多峰性问题上得到好的结果,并且由于在目标空间里没有重复的个体,具有容易生成更多样解的倾向。参

数设置:种群个体数为 10,进化代数为 20,交叉率 0.6,基因长度 20,变异率为 0.08。基于 EBF 近似模型的分禾器参数优化模型如图 8 所示。

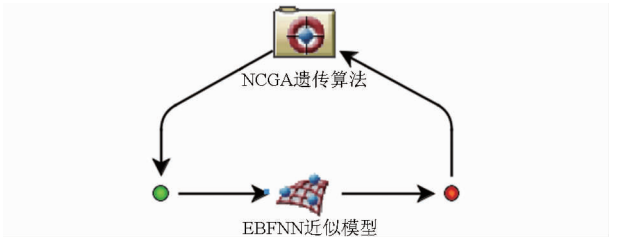


图8 参数优化模型
Fig.8 Parameters optimization model

由响应面图可知,喷雾覆盖率、分禾阻力 2 个目标之间是相互矛盾的,根据权重进行归一化处理,在目标空间 (f_1, f_2) 里,导入根据权重 $w = (w_1, w_2)$ 决定的一个方向。在目标空间里导入对应的等值线,作这个等值线与可行设计空间的切点,就可以得到一个最优解。由于在本次优化中覆盖率占主要地位,取 $w_1 = 0.6, w_2 = 0.4$ 。可行域内的最优解如表 4 所示,根据优化后的分禾器参数取:前倾角 12° 、离地高度 210 mm、作业速度 4 km/h,进行田间试验,重复 3 次取平均值,结果对比如表 4 所示,雾滴覆盖率为 22.49%,与优化结果相对误差 10.89%,分禾器阻力均方根 70.9 N,与优化结果相对误差 7.78%。

表4 结果对比
Tab.4 Results of comparison

参数	前倾角 $x_1/(^\circ)$	离地高度 x_2/mm	作业速度 $x_3/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	雾滴覆盖 率 $Y_1/\%$	分禾阻力均 方根 Y_2/N
优化值	12.16	207.15	4.07	25.24	65.8
试验值	12	210	4	22.49	70.9

5 结论

(1) 利用多学科优化设计软件 Isight, 研究分禾器前倾角、安装高度、作业速度对雾滴覆盖率、分禾阻力的影响规律。采用 Box - Behnken 试验设计方法, 选取能够充分体现设计空间特征的样本点, 在新疆昌吉州进行脱叶剂喷洒试验, 分别使用二次多项式响应面法、Kriging 法以及神经网络法构建了表征因子与响应函数关系的近似模型, 比较模型误差可知, EBF 神经网络法拟合精度最优, 适合分禾器问题的数学建模。

(2) 基于 EBFNN 近似模型技术, 利用多目标遗

传算法对喷雾覆盖率、分禾阻力进行优化研究, 通过确定权重系数对优化后的解集进行了决策分析, 得到一个最优解并进行整机田间脱叶剂喷洒试验验证。

(3) 吊杆喷雾机分禾器最优参数组合为分禾器离地高度 210 mm、分禾器前倾角 12°、喷雾机作业速度 4 km/h。此条件下进行田间试验得到棉花冠层平均雾滴覆盖率最大值为 22.49%, 与模型预测值相比相对误差为 10.89%; 分禾阻力试验均方根 70.9 N, 与模型预测值相对误差为 7.78%。研究结果可为进一步完善棉花脱叶剂喷洒参数优化和分禾器设计提供参考。

参 考 文 献

- 赵新民, 张杰, 王力. 兵团机采棉发展: 现状、问题与对策[J]. 农业经济问题, 2013(3): 87 - 94.
- 马俊贵, 马娟, 刘宏涛, 等. 推进新疆棉花生产全程机械化技术的思考[J]. 新疆农业科技, 2013(5): 52 - 53.
- 孙巍, 杨宝玲, 高振江, 等. 浅析我国棉花机械采收现状及制约因素[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6): 9 - 13.
SUN Wei, YANG Baoling, GAO Zhenjiang, et al. Analysis of mechanical harvest situation and restricting factors of cotton[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(6): 9 - 13. (in Chinese)
- 孙亚伟, 李卫华, 胡新燕, 等. 脱叶剂对棉花脱叶和吐絮的影响研究[J]. 中国棉花, 2011, 38(10): 28 - 29.
SUN Yawei, LI Weihua, HU Xinyan, et al. Effect of defoliant on defoliation and boll opening in upland cotton cultivars [J]. China Cotton, 2011, 38(10): 28 - 29. (in Chinese)
- 雷斌, 张云生, 李忠华, 等. 棉花脱叶剂的田间效果筛选[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(12): 2321 - 2324.
LEI Bin, ZHANG Yunsheng, LI Zhonghua, et al. Screening test of different disleave agents for accelerating effect[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2011, 48(12): 2321 - 2324. (in Chinese)
- 曹阳, 严玉萍, 冯振秀, 等. 棉花机械采收脱叶剂应用试验及提高脱叶效果途径分析[J]. 作物杂志, 2012(4): 144 - 147.
- 王谊, 杨丽红. 脱叶剂对棉花脱叶率和产量的影响[J]. 中国棉花, 2014, 41(4): 28 - 30.
WANG Yi, YANG Lihong. Effect of cotton defoliant on the defoliation rate and yield in Xinjiang[J]. China Cotton, 2014, 41(4): 28 - 30. (in Chinese)
- 董合干, 刘彤, 李勇冠, 等. 新疆棉田地膜残留对棉花产量及土壤理化性质的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 91 - 99.
DONG Hegan, LIU Tong, LI Yongguan, et al. Effect of plastic film residue on cotton yield and soil physical and chemical properties in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 91 - 99. (in Chinese)
- 宁松瑞, 左强, 石建初, 等. 新疆典型膜下滴灌棉花种植模式的用水效率与效益[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 90 - 99.
NING Songrui, ZUO Qiang, SHI Jianchu, et al. Water use efficiency and benefit for typical planting modes of drip-irrigated cotton under film in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(22): 90 - 99. (in Chinese)
- 王刚, 刘辉, 赵海, 等. 新疆兵团棉花机械采收存在的问题及对策[J]. 中国棉花, 2011, 38(9): 37 - 38.
- MCMULLAN P M, THOMAS J M. Cotton insecticide and defoliant efficacy as influenced by spray application parameters [J]. ASTM Special Technical Publication, 2003, 1449: 184 - 198.
- RAJNI, DEOL J S, BRAR A S. Effect of chemical defoliation on boll opening percentage, yield and quality parameters of Bt cotton (*Gossypium hirsutum*) [J]. Indian Journal of Agronomy, 2011, 56(1): 74 - 77.
- 赵东, 张晓辉, 蔡冬梅, 等. 基于弥雾机风机参数优化的雾滴穿透性和沉积性研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 44 - 49.
ZHAO Dong, ZHANG Xiaohui, CAI Dongmei, et al. Study on penetrability and deposited property of droplets by parametric optimization of a mist-sprayer fan[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 44 - 49. (in Chinese)
- 黄春辉, 李国祥. 3WP-1350 喷雾机新型分禾器的设计与应用[J]. 新疆农垦科技, 2015, 38(6): 41 - 42.
- 余鸿飞, 温浩军. 3WP-1350 双药液双管喷雾机的设计[J]. 新疆农垦科技, 2014, 37(11): 32 - 33.
- 陈志, 韩增德, 颜华, 等. 不分行玉米收获机分禾器适应性试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 50 - 52, 86.
CHEN Zhi, HAN Zengde, YAN Hua, et al. Suitability test of no branch of corn harvester apparatus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 50 - 52, 86. (in Chinese)
- 王潇楠, 何雄奎, Andreas Herbst, 等. 喷杆式喷雾机雾滴飘移测试系统研制及性能试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 55 - 62.
WANG Xiaonan, HE Xiongkui, ANDREAS Herbst, et al. System development and performance test of spray bar type sprayer droplet drift test[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 55 - 62. (in Chinese)
- 韩红阳, 陈树人, 邵景世, 等. 机动式喷杆喷雾机机架的轻量化设计[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 47 - 53, 293.

HAN Hongyang, CHEN Shuren, SHAO Jingshi, et al. Lightweight design of chassis frame for motor boom sprayer [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 47–53, 293. (in Chinese)

19 吴鸿欣, 陈志, 韩增德, 等. 玉米植株抗弯特性对分禾器结构的影响分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 6–9. WU Hongxin, CHEN Zhi, HAN Zengde, et al. Effect analysis of bending properties of corn plants on divider structure [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 6–9. (in Chinese)

20 SHARMA P, SINGH L, DILBAGHI N. Optimization of process variables for decolorization of disperse yellow 211 by *Bacillus subtilis* using Box–Behnken design [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164(2–3): 1024–1029.

21 秦维彩, 薛新宇, 周立新, 等. 无人直升机喷雾参数对玉米冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 50–56. QIN Weicai, XUE Xinyu, ZHOU Lixin, et al. Effects of spraying parameters of unmanned aerial vehicle on droplets deposition distribution of maize canopies [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 50–56. (in Chinese)

22 赖宇阳. Isight 参数优化理论与实例详解[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.

23 成棣, 王成国, 刘金朝, 等. 2 种响应面方法在车轮踏面优化中的应用分析比较[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(3): 64–69. CHENG Di, WANG Chengguo, LIU Jinzhao, et al. Application analysis comparison of two response surface methods for the optimization of the wheel tread [J]. China Railway Science, 2010, 31(3): 64–69. (in Chinese)

24 窦毅芳, 刘飞, 张为华. 响应面建模方法的比较分析[J]. 工程设计学报, 2007, 14(5): 359–363. DOU Yifang, LIU Fei, ZHANG Weihua. Research on comparative analysis of response surface methods [J]. Journal of Engineering Design, 2007, 14(5): 359–363. (in Chinese)

25 陈允平, 王旭蕊, 韩宝亮. 人工神经网络原理及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

26 邢红杰, 王泳, 胡包钢. 椭圆基函数神经网络的混合学习算法[J]. 模式识别与人工智能, 2008, 21(2): 148–154. XING Hongjie, WANG Yong, HU Baogang. A hybrid learning algorithm for elliptical basis function neural networks [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2008, 21(2): 148–154. (in Chinese)

27 LUO J C, LEUNG Y, JIANG Z, et al. An elliptical basis function network for classification of remote sensing images [J]. Journal of Geographical Systems, 2004, 6(3): 219–236.

(上接第 20 页)

10 张朋举, 张纹, 陈树人, 等. 八爪式株间机械除草装置虚拟设计与运动仿真[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 56–59. ZHANG P J, ZHANG W, CHEN S R, et al. Virtual design and kinetic simulation for eight claw intra-row mechanical weeding device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 56–59. (in Chinese)

11 胡炼, 罗锡文, 严乙桢, 等. 基于爪齿余摆运动的株间机械除草装置研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 10–16. HU L, LUO X W, YAN Y A, et al. Development and experiment of intra-row mechanical weeding device based on trochoid motion of claw tooth [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(14): 10–16. (in Chinese)

12 张春龙, 黄小龙, 耿长兴, 等. 智能锄草机器人系统设计与仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 196–199. ZHANG C L, HUANG X L, GENG C X, et al. Design and simulation of intelligent weeding robot system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 196–199. (in Chinese)

13 LI N, ZHANG C L, CHEN Z W, et al. Crop positioning for robotic intra-row weeding based on machine vision [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(6): 20–29.

14 OTSU N. A threshold selection method from gray-level histogram [J]. IEEE Transaction on System Man and Cybernetics, 1979, 9(1): 62–66.

15 HAGUE T, TILLET N D. A bandpass filter approach to crop row location and tracking [J]. Mechatronics, 2001, 11(1): 1–12.

16 马铨宏, 李南, 王汉斌, 等. 温室株间电驱锄草机控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 89–93. MA Z H, LI N, WANG H B, et al. Control system for electric drive intra-row weeding [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 89–93. (in Chinese)

17 王汉斌. 锄草机器人对行控制方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. WANG H B. Research on row alignment control method of intelligent weeding robot [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)

18 陈子文, 李南, 孙哲, 等. 行星刷式株间锄草机械手优化与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 94–99. CHEN Z W, LI N, SUN Z, et al. Optimization and experiment of intra-row brush weeding manipulator based on planetary gear train [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 94–99. (in Chinese)