

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.024

梳齿式采棉机籽棉清杂系统参数优化*

陈学庚 康建明

(新疆农垦科学院机械装备研究所, 石河子 832000)

【摘要】 采用二次回归通用旋转组合设计,对籽棉清杂系统的参数进行优化。试验结果和分析表明:影响籽棉含杂率的主要因素是刺钉滚筒转速、锯齿滚筒转速和刷棉滚筒转速,按重要性排序为锯齿滚筒转速、刷棉滚筒转速和刺钉滚筒转速。确定的最优组合为锯齿滚筒转速 291 r/min、刷棉滚筒转速 695 r/min 和刺钉滚筒转速 367 r/min,此时含杂率为 15.10%。

关键词: 梳齿式采棉机 含杂率 数学模型 参数优化

中图分类号: S225.91⁺¹ **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)S0-0120-05

Optimization of Parameters for Cotton Cleaning Unit of Comb-type Cotton Picker

Chen Xuegeng Kang Jianming

(Mechanical Equipment Research Institute, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832000, China)

Abstract

The method of quadratic regression general rotation was used to optimize the parameters of seed cotton cleaning apparatus. The results showed that the main factors of impacting impurity rate walking were the barbed nails drum speed, serrated roller speed and cotton brush roller speed. The three factors gradation importance was the serrated roller speed, cotton brush roller speed and barbed nails drum speed. Optimal group of parameters was the serrated roller speed of 291 r/min, the cotton brush roller speed of 695 r/min, the barbed nails drum speed of 367 r/min. In this case, the impurity was 15.10%.

Key words Comb-type cotton picker, Impurity rate, Mathematical models, Parameter optimization

引言

棉花机械收获在棉花生产机械化中是一项重要而复杂的环节^[1-5]。国内棉花采摘机主要有水平摘锭式和梳齿式。梳齿式采棉机结构简单,生产率高,生产使用成本低,但因采收后籽棉含杂率高制约了其应用推广^[6-8]。籽棉清杂系统是梳齿式采棉机的核心部件,其结构与工作参数的选择和优化是进一步降低采收后籽棉含杂率的关键。目前国内对梳齿式采棉机籽棉清杂系统研究较多采用对比试验和正交试验^[9-10],对籽棉清杂系统影响因素(刺钉滚筒转速、锯齿滚筒转速和刷棉滚筒转速)与性能指标

(含杂率)建立相关关系的研究极少。响应面方法(response surface methodology,简称 RSM)由于其合理的设计及优良的效果,已被各行业所采用,但在籽棉清杂作业的研究中还鲜有报道。本文采用响应面方法对梳齿式采棉机籽棉清杂系统含杂率的影响因素进行研究。

1 试验条件及方法

1.1 试验条件

试验时间是 2011 年 10 月 7~25 日。试验地点为新疆石河子市 133 团盛鑫农场。试验棉田:地块面积 352 hm²;棉花品种为新陆早 33 号;播种方式为

收稿日期:2012-07-08 修回日期:2012-08-20

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAF07B02)

作者简介:陈学庚,研究员,主要从事农业机械机械设计研究,E-mail:kjm531@sina.com

覆膜播种;行距(66+10) cm;平均株高70 cm;最低棉铃高度12 cm;棉花脱叶率82%;吐絮率95%;含水率10%;该棉田产量为4 500 kg/hm²。

籽棉清杂系统主要由刺钉滚筒、锯齿滚筒、刷棉滚筒、格条栅、回收滚筒和出棉管等组成,结构如图1所示。工作时,拖拉机为其提供动力,刺钉滚筒将籽棉打散,并将其均匀抛送至锯齿滚筒,利用籽棉与杂质在锯齿滚筒上的反弹性能与附着力不同,将二者分离,清杂后的籽棉经出棉管进入集棉箱。籽棉清杂系统主要设计参数如表1所示。

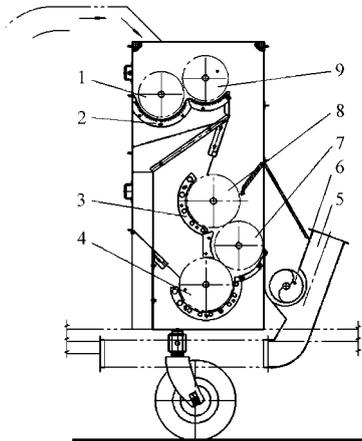


图1 籽棉清杂系统结构简图

Fig. 1 Sketch map of seed cotton cleaning device

1. 刺钉滚筒 a 2. 排杂筛网 3. 格条栅 4. 回收滚筒 5. 出棉管
6. 搅轮 7. 刷棉滚筒 8. 清杂滚筒 9. 刺钉滚筒 b

表1 籽棉清杂系统主要设计参数

Tab. 1 Main design parameters of seed cotton cleaning device

参数	数值
长×宽×高/mm×mm×mm	1 900×870×1 890
生产率/t·h ⁻¹	1.8~2.4
行进速度/km·h ⁻¹	3.6
损失率/%	<5
含杂率/%	<16
配套动力/kW	>48

1.2 试验因素

影响梳齿式采棉机籽棉清杂系统含杂率的因素主要有机组前进速度、刺钉滚筒 a 转速、刺钉滚筒 b 转速、锯齿滚筒转速和刷棉滚筒转速。机组的前进速度越快,喂入到清杂系统中的籽棉也越多,在其他因素一定时,含杂率会升高,反之含杂率会降低^[11]。但在试验过程中,机组的前进速度直接影响采收台工作稳定性,机组前进速度大于3.6 km/h时,采收台极易被堵塞,需停机对采收台进行人工疏导,机组前进速度不大于3.6 km/h时,采收台工作顺畅,无

堵塞现象,故本试验在保证采收台工作顺畅的前提下,设定样机行走速度为3.6 km/h。在前期研究的基础上,本次试验刺钉滚筒 a 和刺钉滚筒 b 转速取值范围为325~378 r/min,锯齿滚筒转速取值范围为282~328 r/min,刷棉滚筒转速取值范围为594~721 r/min。

1.3 试验方法

拖拉机牵引清杂系统以3.6 km/h的速度行走,每隔30 m按试验方案调整各滚筒转速,每30 m取样3次,每次取样品5 kg,检出其中杂质,计算籽棉含杂率的平均值。

根据 Box-Behnken 中心组合试验设计原理^[12-13],综合单因素试验结果选取对籽棉含杂率影响显著的刺钉滚筒转速、锯齿滚筒转速、刷棉滚筒转速3个因素,进行3因素5水平的响应面分析,试验因素与水平设计如表2所示。

表2 自然因素水平及其编码

Tab. 2 Coding of natural factors and levels

编码	因素		
	刺钉滚筒转速	锯齿滚筒转速	刷棉滚筒转速
	$x_1/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$x_2/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$x_3/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$
-1.682	324	282	593
-1	335	291	619
0	351	305	657
1	367	319	695
1.682	378	328	721

2 结果分析

采用三因素二次回归正交旋转组合试验设计方案对影响籽棉含杂率的3个主要参数组合进行优化。试验方案及试验结果如表3所示,回归方程的方差分析如表4所示。

2.1 试验结果回归分析

利用 Design-Expert 7.0 软件对表3中的试验结果进行多元回归拟合,得出回归方程中的各项系数(表4),并用 F 检验显著性^[14]。

由表3得出含杂率 Y 的回归方程

$$Y = 13.18 - 0.7X_1 + 0.3X_2 + 0.63X_3 - 0.41X_1X_2 + 0.72X_1X_3 + 1.19X_2X_3 + 1.36X_1^2 + 0.51X_2^2 + 1.1X_3^2 \quad (1)$$

对籽棉含杂率 Y 编码空间的回归方程模型进行方差分析,结果见表5所示。

由 $4.99 < F_{0.99}(5, 8) = 6.63$, 检验结果表明,在整个研究区域内部,回归方程与实测值拟合较好,所取回归模型合适。由 $51.3 > F_{0.99}(9, 13) = 4.19$,

表3 响应面分析方案及试验结果

Tab.3 Experimental plan and results of response surface analysis

试验号	刺钉滚筒转速 X_1	锯齿滚筒转速 X_2	刷棉滚筒转速 X_3	含杂率 Y/%
1	1	1	1	16.13
2	1	1	-1	15.64
3	1	-1	1	15.10
4	1	-1	-1	16.38
5	-1	1	1	15.82
6	-1	1	-1	17.34
7	-1	-1	1	16.83
8	-1	-1	-1	16.62
9	1.682	0	0	16.01
10	-1.682	0	0	17.29
11	0	1.682	0	18.26
12	0	-1.682	0	16.36
13	0	0	1.682	16.38
14	0	0	-1.682	15.62
15	0	0	0	16.43
16	0	0	0	15.70
17	0	0	0	15.82
18	0	0	0	15.26
19	0	0	0	16.10
20	0	0	0	16.98

表4 回归系数及显著性检验

Tab.4 Regression coefficient and significance test of response surface analysis

序号	回归项	回归系数	标准差	F	P
1	常数项	2.96	0.16	15.09	0.0038**
2	X_1	-0.70	0.10	17.36	0.0088**
3	X_2	0.30	0.10	17.56	0.0086**
4	X_3	0.63	0.10	6.97	0.0483*
5	X_1X_2	-0.41	0.14	19.46	0.0069**
6	X_1X_3	0.72	0.14	7.24	0.0425*
7	X_2X_3	1.19	0.14	31.97	0.0024**
8	X_1^2	1.36	0.15	8.35	0.0321*
9	X_2^2	0.51	0.15	16.58	0.0047**
10	X_3^2	1.10	0.15	6.99	0.0458*

注: **表示 $P < 0.01$ (很显著), *表示 $P < 0.05$ (显著)。

表5 二次回归方程模型的方差分析

Tab.5 Variance analysis of quadratic regression model

来源	平方和	自由度	均方差	F
回归	4.4744	9	0.4972	51.3
剩余	2.288	13	0.176	
误差	1.7349	8	0.2174	
拟合	0.5531	5	0.819	4.99
总和	158.9	22	7.223	
显著性	$F_{0.99}(9,13) = 4.19$ $F_{0.95}(9,13) = 2.71$ $F_{0.99}(5,8) = 6.63$			

检验结果表明,回归方程在 $\alpha = 0.05$ 水平上是显著的,二次回归方程拟合较好。

2.2 影响因素重要性分析

从表6的分析结果可知,对含杂率的影响效果由大到小为: X_2 、 X_3 、 X_1 ,即影响因素重要性顺序为:锯齿滚筒转速、刷棉滚筒转速和刺钉滚筒转速。

表6 影响因素的重要性分析

Tab.6 Importance analysis of factors

因素	自由度	方差	均方差
刺钉滚筒转速 X_1	1	0.2408	0.2400
锯齿滚筒转速 X_2	1	0.8420	0.8420
刷棉滚筒转速 X_3	1	0.6427	0.6427

2.2.1 单因素分析

固定其中2个因素于0水平,求第3个因素与含杂率的降维回归方程:

刺钉滚筒转速与含杂率的回归方程

$$Y = 13.18 - 0.7X_1 + 1.36X_1^2$$

锯齿滚筒转速与含杂率的回归方程

$$Y = 13.18 + 0.3X_2 + 0.51X_2^2$$

刷棉滚筒转速与含杂率的回归方程

$$Y = 13.18 + 0.63X_3 + 1.1X_3^2$$

根据这些方程得到3个因子对含杂率影响的关系曲线如图2所示。

从图2可看出,随着刺钉滚筒转速不断增大,含杂率在338.2~351.4 r/min之间达到最小值;随着

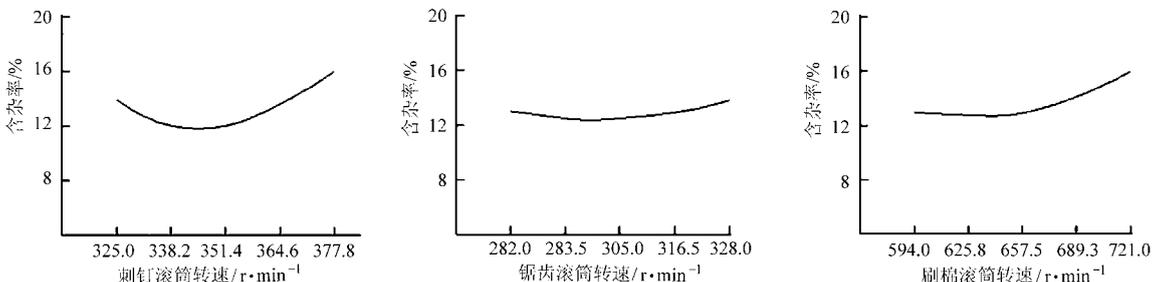


图2 单因素与含杂率关系曲线

Fig.2 Relationship of single factor and impurity rate

锯齿滚筒转速增大,含杂率在 283.5 ~ 305.0 r/min 之间达到最小值;随着刷棉滚筒转速的增大,含杂率在 625.8 ~ 657.5 r/min 之间达到最小值,含杂率均呈先降后升趋势,这与单因素预试验结果一致,试验范围选择恰当。

2.2.2 交互作用分析

在式(1)中,确定任意一个因素在零水平,研究其余 2 个因素间的交互效应。应用 Design-Expert 7.0 统计分析软件做响应曲面^[15-18],分析刺钉滚筒转速、锯齿滚筒转速和刷棉滚筒转速对含杂率的影响。

(1) 刺钉滚筒转速和锯齿滚筒转速

将建立的回归方程中 X_3 固定在 0 水平,即可得到 X_1 、 X_2 对指标 Y 影响的子模型

$$Y = 13.18 - 0.7X_1 + 0.3X_2 - 0.41X_1X_2 + 1.36X_1^2 + 0.51X_2^2$$

所得回归方程对应的响应曲面如图 3a 所示。由图中可以看出,含杂率随着刺钉滚筒转速的增加先减小后增大,要使含杂率最小,最优刺钉滚筒转速范围为 335.0 ~ 351.0 r/min。含杂率随着锯齿滚筒转速的增加逐渐减小,但是当含杂率达到最小值时继续增大锯齿滚筒转速,含杂率又呈上升的趋势。说明锯齿滚筒转速过小时,含杂率反而会增大,这是因为杂质与籽棉的粘合力大于杂质随滚筒旋转的离心力,至使杂质不能与籽棉分离。对应的锯齿滚筒转速应在 291.0 ~ 305.0 r/min。

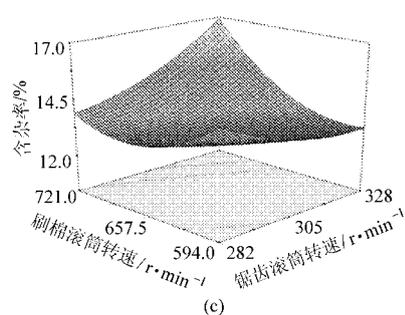
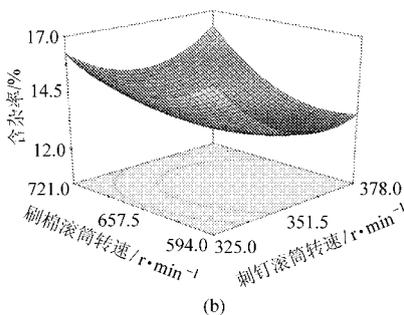
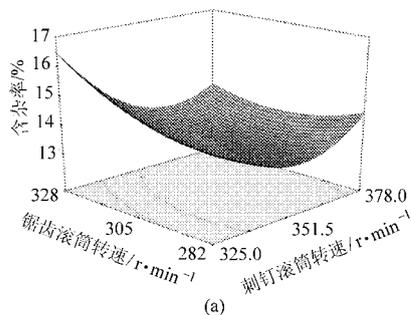


图 3 因素交互作用对含杂率的影响

Fig. 3 Effect of factors interaction on impurity rate

3 优化求解与验证

3.1 优化分析

参数优化理想的结果是在约束条件范围内尽可能减少含杂率,因此将其作为评价指标,建立数学模型如下:

$$\text{目标函数 } \min Y(X_1, X_2, X_3)$$

$$\text{约束条件 } -1.682 \leq X_1 \leq 1.682$$

$$-1.682 \leq X_2 \leq 1.682$$

$$-1.682 \leq X_3 \leq 1.682$$

(2) 刺钉滚筒转速和刷棉滚筒转速

将建立的回归方程中 X_2 固定在 0 水平,即可得到 X_1 、 X_3 对指标 Y 影响的子模型

$$Y = 13.18 - 0.7X_1 + 0.63X_3 + 0.72X_1X_3 + 1.36X_1^2 + 1.1X_3^2$$

从图 3b 中可以看出,在刺钉滚筒转速为 351 r/min、锯齿滚筒转速为 305 r/min、刷棉滚筒转速为 657 r/min 水平时,含杂率出现极小峰值。还可以看出,在刺钉滚筒转速的各水平下,含杂率随着刷棉滚筒转速的增大呈先减小后增大的趋势。在刷棉滚筒转速各水平下,含杂率随着刺钉滚筒的增大呈相同趋势。

(3) 锯齿滚筒转速和刷棉滚筒转速

将建立的回归方程中 X_1 固定在 0 水平,即可得到 X_2 、 X_3 对指标 Y 影响的子模型

$$Y = 13.18 + 0.3X_2 + 0.63X_3 + 1.19X_2X_3 + 0.51X_2^2 + 1.1X_3^2$$

从图 3c 中可以看出:在锯齿滚筒各个水平下,其对应的含杂率随着刷棉滚筒转速的增加呈先减小后增大的趋势。在刷棉滚筒各个水平下,其对应的含杂率随着锯齿滚筒转速的增加呈相同的趋势。当刺钉滚筒转速为 351.0 r/min 时,随着锯齿滚筒转速和刷棉滚筒转速的增加,含杂率呈先减小后增大的趋势。由图 3c 可以看出,含杂率极小值对应的锯齿滚筒转速范围为 305.0 ~ 319.0 r/min,对应刷棉滚筒转速范围为 619.0 ~ 657.0 r/min。

利用牛顿迭代法规划求解,得到含杂率最小时的最佳试验参数组合:刺钉滚筒转速 366 r/min,锯齿滚筒转速 316 r/min 和刷棉滚筒转速 706 r/min。优化后的含杂率理论值为 14.54%。

3.2 试验验证

实际作业时,机组工作参数的调整受到传动系统中齿轮设计的参数限制,很难调整到优化后的参数组合,取刺钉滚筒转速为 367 r/min、锯齿滚筒转速 291 r/min 和刷棉滚筒转速为 695 r/min,试验重复 3 次取平均值,此时籽棉含杂率为 15.10%,与优

化值(14.54%)差别不大,这一差异在实际作业过程中影响甚微。

4 结论

(1)根据二次正交旋转回归试验设计方法,建立了影响因素与含杂率之间的数学回归模型,并研究了刺钉滚筒转速、锯齿滚筒转速和刷棉滚筒转速对含杂率的影响。

(2)利用有约束非线性优化理论对回归方程的

设计参数进行优化,确定了一组最优参数组合刺钉滚筒转速 366 r/min、锯齿滚筒转速 316 r/min 和刷棉滚筒转速 706 r/min,优化后的含杂率理论值为 14.54%。但是,考虑实际作业过程中的参数调整问题,推荐参数组合为:刺钉滚筒转速 367 r/min、锯齿滚筒转速 291 r/min 和刷棉滚筒转速 695 r/min,该条件下对应的籽棉含杂率为 15.10%,与优化后的理论最佳值 14.54% 相差很小。

参 考 文 献

- 1 陈发,阎洪山,王学农. 棉花现代生产机械化技术与装备[M]. 乌鲁木齐:新疆科学技术出版社,2008.
- 2 李生军,周亚立,闫向辉. 棉花收获机械化[M]. 乌鲁木齐:新疆科学技术出版社,2008.
- 3 王新国. 国产采棉机的应用与发展前景[J]. 农业机械,2003(11):48.
- 4 周亚立,李生军,刘向新,等. 新疆生产建设兵团棉花生产机械化技术[J]. 新疆农机化,2005(5):8~10.
- 5 沈玲凤. 兵团农场采棉机械化发展的制约因素及对策[J]. 新疆农机化,2004(4):46~47.
- 6 黄勇,付威,吴杰. 国内外机采棉技术分析比较[J]. 新疆农机化,2005(4):18~20.
- 7 梅健. 机采棉加工技术讲座:棉花收获机械(第二讲)[J]. 中国棉花加工,2002(3):31~33.
- 8 周亚立,刘向新. 机采棉技术的发展现状、问题及对策[C]//2010国际农业工程大会论文集,北京,2010.
Zhou Yali, Liu Xiangxin. Development situation, problem and counter measure of cotton technology[C]//Proceedings of the 2010 International Conference of Agricultural Engineering, Beijing, 2010. (in Chinese)
- 9 温浩军,陈学庚,康建明. 梳齿式采棉机籽棉清杂系统的研制[J]. 农机化研究,2010(4):59~62.
Wen Haojun, Chen Xuegeng, Kang Jianming. Comb cotton picking machine development of seed cotton cleaning equipment study on agricultural mechanization[J]. Agricultural Mechanization Research, 2010(4):59~62. (in Chinese)
- 10 康建明,陈学庚,温浩军,等. 梳齿式采棉机籽棉清杂系统的设计与性能试验[J]. 石河子大学学报:自然科学版,2010,28(5):631~635.
Kang Jianming, Chen Xuegeng, Wen Haojun, et al. Comb cotton picking machine design and performance test of seed cotton cleaning plant[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2010, 28(5): 631~635. (in Chinese)
- 11 中国科学院农业机械化研究所. 棉花收获机械译文集[M]. 北京:机械工业出版社,1960.
- 12 吴崇友,丁为民,石磊,等. 油菜分段收获捡拾脱粒机捡拾损失响应面分析[J]. 农业机械学报,2011,42(8):89~93.
Wu Chongyou, Ding Weimin, Shi Lei, et al. Response surface analysis of pickup losses in two-stage harvesting for rapeseed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 89~93. (in Chinese)
- 13 吴崇友,丁为民,张敏. 油菜分段收获脱粒清选试验[J]. 农业机械学报,2010,41(8):70~76.
Wu Chongyou, Ding Weimin, Zhang Min. Cleaning experiment of rape segment harvest threshing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 70~76. (in Chinese)
- 14 费荣昌. 试验设计与数据处理[M]. 无锡:江南大学出版社,2001:59~63.
- 15 侯守印,陈海涛. 立式轴流大豆育种脱粒机参数优化[J]. 农业工程学报,2012,28(5):19~25.
Hou Shouyin, Chen Haitao. Parameters optimization of vertical axial flow thresher for soybean breeding[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5): 19~25. (in Chinese)
- 16 张黎骅,张文,吕珍珍,等. 响应面法优化酒糟微波间歇干燥工艺[J]. 农业工程学报,2011,27(3):369~374.
Zhang Lihua, Zhang Wen, Lü Zhenzhen, et al. Optimization of intermittent microwave drying technology for lees by response surface methodology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(3): 369~374. (in Chinese)
- 17 Funda Kahraman. The use of response surface methodology for prediction and analysis of surface roughness of AISI 4140 steel [J]. Materials and Technology, 2009, 43(5): 267~270.
- 18 易军鹏,朱文学,马海乐,等. 牡丹籽油超声波辅助提取工艺的响应面法优化[J]. 农业机械学报,2009,40(6):103~110.
Yi Junpeng, Zhu Wenxue, Ma Haile, et al. Optimization on ultrasonic-assisted extraction technology of oil from *Paeonia suffruticosa* Andr. seeds with response surface analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 103~110. (in Chinese)