

横置差速轴流脱分选系统设计与试验

王志明^{1,2} 吕彭民¹ 陈霓² 李骅³ 刘正怀² 陈德俊²

(1. 长安大学工程机械学院, 西安 710064; 2. 金华职业技术学院机电工程学院, 金华 321017;
3. 南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 针对横置轴流滚筒长度受限和脱出物在清选筛入口一角堆积严重的问题,设计了以同轴差速脱粒滚筒、圆锥形清选风机、双层振动筛和螺旋板齿式复脱器为主要工作部件的横置差速轴流式脱分选系统。为了提升横置差速轴流脱分选系统工作性能,设计了喂入量为 2 kg/s 的试验台,采用二次正交旋转组合设计法进行工作性能试验,考察差速滚筒转速组合、圆锥形风机叶片锥度、差速滚筒高低速段长度配比 3 个因素对损失率、破碎率、含杂率和脱粒功耗 4 个性能指标的影响。建立了损失率、破碎率、含杂率、脱粒功耗的回归数学模型,利用 Matlab 优化工具箱对回归数学模型进行了多目标优化计算。结果表明:影响横置差速轴流脱分选系统损失率、含杂率的 3 个因素主次顺序依次为差速滚筒转速组合、圆锥形风机叶片锥度、差速滚筒高低速段长度配比;影响横置差速轴流脱分选系统破碎率、脱粒功耗的 3 个因素主次顺序依次为差速滚筒转速组合、差速滚筒高低速段长度配比、圆锥形风机叶片锥度;最优参数组合为:差速滚筒转速组合 750、850 r/min,风机叶片锥度 3.8°,高速段比例 30%;对应工作性能指标为:损失率 1.57%、破碎率 0.71%、含杂率 0.38%,脱粒功耗 6.67 kW/kg。田间试验结果表明,横置差速轴流脱分选系统工作性能指标优于行业标准。

关键词: 联合收获机; 差速脱粒; 脱分选系统; 性能试验; 回归数学模型

中图分类号: S225.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0053-09

Design and Experiment on Axial-flow Differential-speed Threshing – Separating – Cleaning Unit

Wang Zhiming^{1,2} Lü Pengmin¹ Chen Ni² Li Hua³ Liu Zhenghuai² Chen Dejun²

(1. School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China
2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Jinhua Polytechnic, Jinhua 321017, China
3. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: In order to solve the problem of poor threshing ability because of the transverse space limitation and grain mound in the entrance of longitudinal cleaning sieve of axial flow threshing – separating – cleaning unit in combine harvest, a new type axial-flow differential-speed threshing – separating – cleaning unit was designed, which consisted of coaxial differential-speed threshing cylinder, conical centrifugal fan, double-layer vibration sieve and rethreshing system with helical plate tooth. The test-bed at feed rate of 2 kg/s for rice was developed, the optimal structural parameters and operation parameters were explored by quadratics rotary orthogonal combination design experiment. The mathematical models of loss rate, crushing rate, impurity rate and power consumption were established by means of regression analysis. The influences of rotary speed combination of differential-speed roller, blade taper of conical centrifugal fan and length ratio of differential-speed cylinder on loss rate, crushing rate, impurity rate and

收稿日期: 2016-05-05 修回日期: 2016-09-09
基金项目: 国家自然科学基金项目(51305182)、浙江省自然科学基金项目(Y1110647)和浙江省公益性技术应用研究项目(2013C32027、2017C32097)
作者简介: 王志明(1981—),男,博士生,金华职业技术学院副教授,主要从事现代农业机械设计理论与研究,E-mail: jhcwzm@163.com
通信作者: 陈德俊(1936—),男,教授,主要从事水稻收获机械设计与理论研究,E-mail: cdj0579@163.com

power consumption had been analyzed, and multi-objective optimization based on Matlab optimum toolbox was applied. The results indicated that the sequences of factors influencing the threshing and cleaning performance about loss rate and impurity rate were rotary speed combination of differential-speed roller, blade taper of conical centrifugal fan, length ratio of differential-speed cylinder, and the sequences of factors influencing crushing rate and power consumption were rotary speed combination of differential-speed roller, length ratio of differential-speed cylinder and blade taper of conical centrifugal fan. The values of optimum scheme were 750 r/min and 850 r/min, 3.8°, 30%, respectively. The loss rate was 1.57%, broken rate was 0.71% and impurity rate was 0.38%. The total threshing power consumption was 6.67 kW/kg, and the low speed threshing cylinder and high speed threshing cylinder accounted for about 59.3% and 40.7% of total threshing power consumption, respectively. The results of field experiment indicated that the indexes of working performance of axial-flow differential-speed threshing – separating – cleaning unit were more effective than national standards. The study would provide some theoretical basis for the design of axial-flow differential-speed threshing – separating – cleaning unit.

Key words: combine harvester; differential-speed thresh; threshing – separating – cleaning unit; performance test; regression mathematical model

引言

在南方,为了适应小田块作业,普遍采用杆齿式横置轴流单滚筒联合收获机进行水稻收获作业,其脱粒、分离和清选工作质量直接影响整机性能。国内外学者对联合收获机脱粒分离和清选开展了仿真和试验研究,以提升联合收获机工作性能^[1-15]。上述研究单独针对脱粒或清选工序进行,所设计的试验台架也多为脱粒、清选分段进行,而对脱粒滚筒和清选风机交互作用下的脱分选系统综合性能研究较少。此外,现有研究均在单速滚筒和圆柱形清选风机条件下进行,未能从根本上解决横置轴流式脱分选系统因滚筒长度受限导致脱粒能力不足和脱出物在清选筛入口一角堆积影响清选效果等问题。

为解决上述问题,本文在同轴差速脱粒和圆锥形风机清选 2 项技术研究的基础上^[16-18],设计一种横置差速轴流脱分选系统。为了探明差速滚筒转速组合、差速滚筒高低速段长度配比、圆锥形风机叶片锥度等工作参数对横置差速轴流脱分选系统工作性能(损失率、破碎率、含杂率)和脱粒功耗的影响,以横置差速脱分选系统实际结构和尺寸,设计试验台,采用二次旋转正交组合设计法进行横置差速轴流脱分选系统性能试验,分析各因素对性能指标的影响程度,获得最佳结构参数和工作参数组合,以期为优化横置差速脱分选系统提供理论依据。

1 横置差速轴流脱分选系统试验台架设计

1.1 横置差速轴流脱分选系统结构与工作原理

横置差速轴流脱分选系统主要由同轴差速脱粒分离部件、风筛式清选部件、螺旋板齿式杂余复脱器

组成,如图 1 所示。其工作原理为:切向喂入的物料经轴流滚筒脱粒,以籽粒为主的脱出物在离心力作用下呈径向穿越栅格式凹板向振动筛分离;脱出物下落到振动筛后,在圆锥形离心式清选风机风力和双层振动筛共同作用下进行清选;碎茎叶和颖壳被吹出机外;清洁籽粒由籽粒水平螺旋输送机收集后,经垂直螺旋输送机送入集粮箱;部分杂余在振动筛尾筛落下,由杂余水平螺旋输送机收集,经杂余垂直螺旋输送机送入复脱器,复脱后物料返回振动筛二次清选;经脱粒的茎秆在高速滚筒一端径向排出机外。

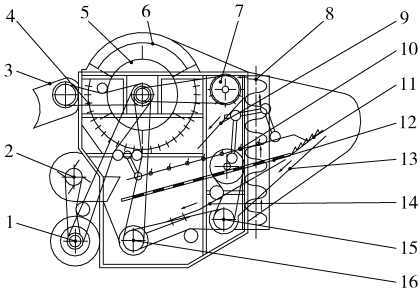


图 1 横置差速轴流脱分选系统结构示意图
Fig.1 Structure of differential-speed axial-flow threshing – separating – cleaning unit

- 1. 传动轴 2. 圆锥形风机 3. 输送槽 4. 栅格式凹板 5. 杆齿式差速脱粒滚筒 6. 导向板 7. 复脱器 8. 杂余垂直螺旋输送机 9. 脱出物滑板 10. 上筛 11. 尾筛 12. 下筛 13. 杂余回收滑板 14. 籽粒收集滑板 15. 杂余回收螺旋输送机 16. 籽粒水平螺旋输送机

同轴差速脱粒分离部件由杆齿式差速脱粒滚筒、栅格式凹板筛、带导向板罩壳组成,杆齿式差速脱粒滚筒如图 2 所示。同轴差速轴流滚筒的低速段主要用于大部分易脱籽粒的脱粒分离,高速段滚筒

主要用于少量难脱籽粒的脱粒分离和低速滚筒未分离籽粒的分离,利用低速脱粒降低籽粒和茎秆的破碎,利用高速脱粒降低脱不净损失并提高分离率,在不增加滚筒长度的条件下提高横置轴流式脱分选系统脱粒分离能力。

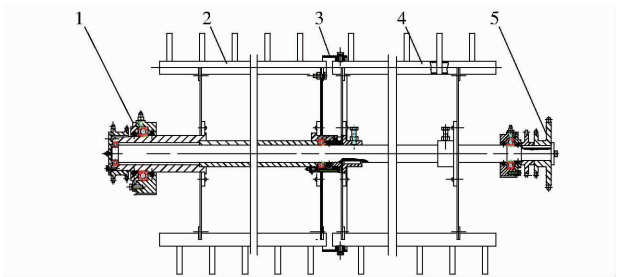


图2 杆齿式差速脱粒滚筒结构图

Fig.2 Structure of rod tooth differential-speed threshing cylinder

1. 低速滚筒驱动链轮 2. 低速滚筒 3. 防干涉挡圈 4. 高速滚筒 5. 高速滚筒驱动链轮

清选部件由圆锥形离心式清选风机和双层振动筛(上筛为鱼鳞筛,下筛为圆孔筛)组成,圆锥形清选风机结构如图 3 所示。圆锥形离心式清选风机利用风机叶片大、小端的直径差产生风压差,在振动筛前部产生横向风,将下落的脱出物沿筛宽方向吹散,避免脱出物在振动筛面入口一角堆积,改善横置轴流式脱分选系统的清选性能。

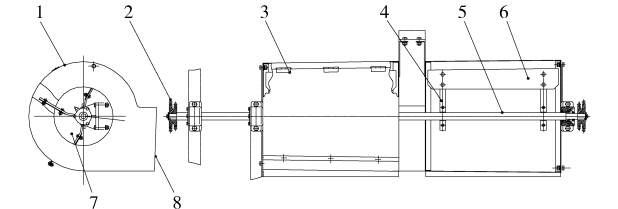


图3 圆锥形离心式清选风机结构图

Fig.3 Structure of conical centrifugal cleaning fan

1. 风机壳体 2. 驱动链轮 3. 风机壳合页 4. 风机叶片支架 5. 转轴 6. 风机叶片 7. 进风口 8. 出风口

横置差速脱分选系统采用了杆齿式差速脱粒滚筒和圆锥形离心式清选风机等部件,以提升脱分选综合工作性能,但差速滚筒转速组合、差速滚筒高低速段长度配比、圆锥形风机叶片锥度等工作参数对横置差速轴流脱分选系统工作性能和脱粒功耗的影响情况尚不明确,需要通过试验优化结构,掌握各因素对性能指标的影响程度。

1.2 试验台结构与工作参数

以横置差速脱分选系统实际结构自行研制的试验台由机架、物料输送装置、喂入装置、脱粒装置、清选装置以及测控装置构成,其结构如图 4 所示。

物料输送装置共 4 台,每台尺寸:长 5 000 mm、宽 900 mm,高度可调,可串联或并联使用;平行输送

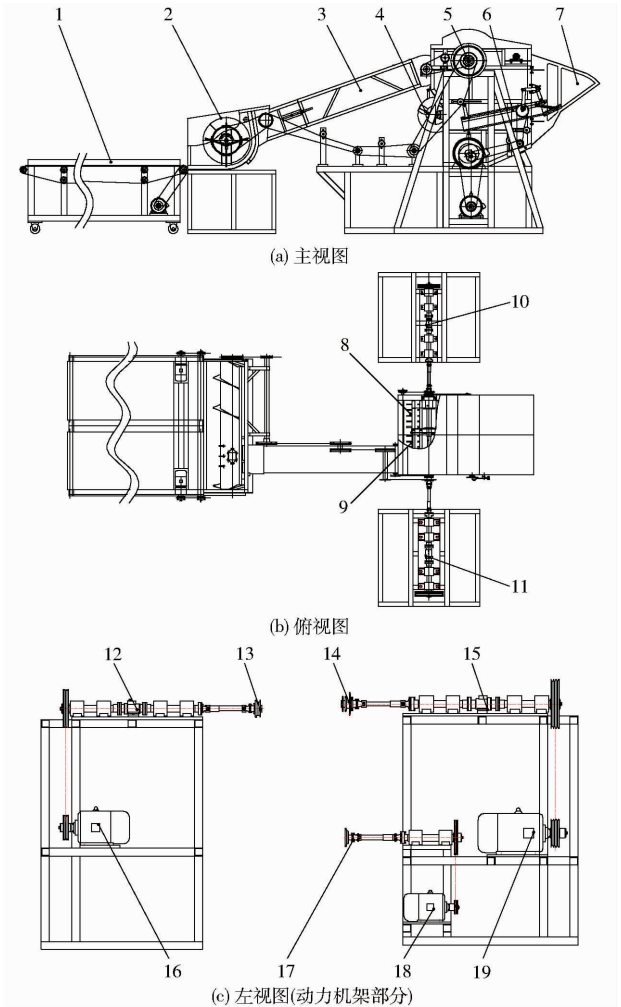


图4 横置差速轴流脱分选试验台结构示意图

Fig.4 Schematic diagrams of test-bed

1. 物料输送带 2. 喂入螺旋输送机 3. 输送槽组件 4. 圆锥形清选风机 5. 差速脱粒滚筒 6. 双层振动筛 7. 杂质出口 8. 高速段滚筒 9. 低速段滚筒 10. 高速段滚筒动力输入轴 11. 低速段滚筒动力输入轴 12. 高速滚筒扭矩传感器 13. 高速滚筒端万向联轴器 14. 低速滚筒端万向联轴器 15. 低速滚筒扭矩传感器 16. 高速滚筒驱动电动机 17. 清选风机万向联轴器 18. 清选风机驱动电动机 19. 低速滚筒驱动电动机

胶带速度可根据不同喂入量的要求无级可调,输送速度为 0 ~ 2 m/s,通过调节张紧轮位置可以调节平行输送胶带的张紧度。

低速滚筒驱动电动机功率为 20 kW,转速为 500 ~ 1 000 r/min;高速滚筒驱动电动机功率为 10 kW,转速为 600 ~ 1 200 r/min;高、低速脱粒滚筒两端各配一个 T-660 型扭矩传感器,量程为 (0 ± 100) N·m、(0 ± 300) N·m,用于测量高速滚筒、低速滚筒的扭矩、转速和功率;根据试验方案,备有供试差速脱粒滚筒 5 组,每组高、低速滚筒直径均为 550 cm,栅格凹板包角为 230°,罩壳导向板螺旋角为 32°,脱粒滚筒总工作长度(含高、低速段)为 1 000 mm,整体更换。根据试验方案要求,配置 5 组不同锥度风机叶片,试验时根据需要更换风机叶片。

测控装置主要由电气控制系统和数据采集系统组成。电气控制系统供电电源为标准的三相四线制,380 V、50 Hz 三相交流电源。在电气控制柜内安装有变频器、控制变压器、自动空气开关、交流接触器、整流桥、小型中间继电器、多功能插座等。控制柜门板上安装有总启动按钮、紧急停止按钮、变频器数字操作器(包括变频器参数设置以及所附电位器的调整、ON/OFF 开关)和指示灯等。数据采集系统由扭矩传感器、数据采集卡、USB 连线、计算机等组成,高、低速滚筒两端的转速、扭矩、功率等数据自动保存在计算机上,并以图形形式实时显示在计算机屏幕上。

1.3 试验台工作过程

试验前,根据喂入量设置作物输送速度,测量输送台从启动到达设定速度的时间,计算输送台前端的预留空间,不放置作物。按设定喂入量(2 kg/s),每组试验将相等质量的水稻均匀铺放在输送台平胶带的指定范围内,茎秆长度方向与输送方向一致,穗头朝前,以保证均匀定量喂入。根据试验方案,分别安装 5 种不同长度配比的差速滚筒和 5 种不同锥度的风机叶片,并通过变频器调节高、低速滚筒转速和输送台速度。

试验时,按顺序启动高速滚筒、低速滚筒、清选装置的电动机开关,待上述装置各转动件达到并稳定预设的工作参数后,启动测控系统软件,最后开启物料输送台电动机开关。

2 试验方案

2.1 试验物料

试验在室内进行,试验水稻品种采用浙江省广为种植的“甬优 15”,人工收割(割茬高度为150 mm)后当日进行试验。水稻部分特性如表 1 所示。

表 1 试验水稻基本特性参数
Tab.1 Basic properties of rice

参数	数值
物料株高/cm	100 ~ 115
穗长/cm	17.5 ~ 26.4
籽粒含水率/%	23.3 ~ 24.5
茎秆含水率/%	45.4 ~ 48.6
草谷比(割茬 15 cm)	3
稻谷千粒质量/g	30.6
单产/(kg·hm ⁻²)	10 020

2.2 二次正交旋转组合试验方案

在自行研制的试验台上,对横置差速轴流脱分选系统进行水稻脱分选性能试验,考察差速滚筒转速组合(转速组合 x_1)、差速滚筒高低速段长度配比

(高速段比例 x_2)、圆锥形风机叶片锥度(叶片锥度 x_3)3 个主要因素对脱粒清选装置工作性能(损失率 y_1 、破碎率 y_2 、含杂率 y_3 、脱粒功耗 y_4)的影响。试验重复 2 次,试验现场如图 5 所示。



图 5 试验现场
Fig.5 Experimental site

采用二次正交旋转组合设计方法设计试验方案,根据理论分析和生产实际,确定每个试验因素的取值范围,初步选取较为理想的因素水平,因素编码如表 2 所示^[19-20]。

表 2 因素编码
Tab.2 Coding of factors

编码	因素		
	转速组合 $x_1/(r \cdot min^{-1})$	高速段比例 $x_2/\%$	叶片锥度 $x_3/(^{\circ})$
1.682	918、1 018	46.8	3.8
1	850、950	40	3.5
0	750、850	30	3.0
-1	650、750	20	2.5
-1.682	582、682	13.2	2.2

2.3 试验指标测定方法与试验结果

试验后,收集与清理排草口和清选室出口的排出物,计算出损失率(包括未脱净籽粒、夹带损失、清选损失),从接粮口取样测定破碎率、含杂率。试验物料收集区域如图 6 所示。



图 6 试验后物料采集区域
Fig.6 Material collecting area after experiment

根据喂入量和草谷比,求得每次试验所得籽粒总质量,记为 W 。从接粮口取样,记总质量 W_1 。手工挑选出破碎籽粒、杂质并分别称量,记为 W_2 、 W_3 。

从清选室出口和排草口分别收集全部排出物,手工挑选籽粒和含籽粒断穗并称量,分别记为清选损失 W_4 和夹带损失 W_5 。

损失率 y_1 、破碎率 y_2 、含杂率 y_3 计算公式为

$$y_1 = (W_4 + W_5) / W \times 100\%$$

(1)

$$y_2 = W_2 / W_1 \times 100\%$$

(2)

$$y_3 = W_3 / W_1 \times 100\%$$

(3)

根据三元二次正交旋转组合设计安排试验,试验方案和结果如表 3 所示,表中 X_1 、 X_2 、 X_3 表示各因素编码值。

表 3 二次回归正交旋转试验方案与结果

Tab. 3 Scheme and results for quadratic regression orthogonal experiment

试验序号	转速组合 X_1	高速段比例 X_2	叶片锥度 X_3	损失率 $y_1 / \%$	破碎率 $y_2 / \%$	含杂率 $y_3 / \%$	高速滚筒 功耗/kW	低速滚筒 功耗/kW	脱粒总功 耗/kW
1	1	1	1	2.69	0.82	0.64	5.96	10.79	16.75
2	1	1	-1	1.95	0.86	0.85	6.17	10.32	16.49
3	1	-1	1	1.98	0.77	0.78	5.32	10.19	15.51
4	1	-1	-1	2.33	0.84	0.98	5.22	10.23	15.45
5	-1	1	1	1.78	0.49	0.32	4.78	9.16	13.94
6	-1	1	-1	1.56	0.51	0.49	4.86	8.39	13.25
7	-1	-1	1	1.44	0.44	0.31	4.55	8.12	12.67
8	-1	-1	-1	1.68	0.34	0.96	4.58	7.44	12.02
9	-1.682	0	0	0.88	0.35	0.39	4.14	7.17	11.31
10	1.682	0	0	2.78	0.98	0.78	6.12	13.70	19.82
11	0	-1.682	0	1.35	0.78	0.79	5.02	9.12	14.14
12	0	1.682	0	1.45	0.57	0.88	4.99	11.23	16.22
13	0	0	-1.682	1.38	0.41	0.78	5.11	8.40	13.51
14	0	0	1.682	1.57	0.71	0.38	5.43	7.90	13.33
15	0	0	0	1.43	0.54	0.47	5.78	8.23	14.01
16	0	0	0	1.24	0.58	0.43	5.55	9.24	14.79
17	0	0	0	1.33	0.64	0.53	4.98	9.17	14.15
18	0	0	0	1.21	0.44	0.47	5.23	9.68	14.91
19	0	0	0	1.48	0.53	0.48	5.41	9.22	14.63
20	0	0	0	1.11	0.58	0.39	4.76	9.27	14.03
21	0	0	0	1.09	0.61	0.51	4.78	9.70	14.48
22	0	0	0	1.47	0.57	0.45	5.13	9.89	15.02
23	0	0	0	1.23	0.49	0.48	5.23	9.38	14.61

3 试验结果分析

3.1 回归方程及显著性检验

根据 23 次试验所得结果,运用 DPS 数据处理,可得损失率的三元二次回归方程为

$$y_1 = 1.28 + 0.42X_1 + 0.05X_2 + 0.05X_3 + 0.26X_1^2 + 0.11X_2^2 + 0.14X_3^2 + 0.01X_1X_2 + 0.05X_1X_3 + 0.19X_2X_3$$

(4)

回归方程的方差分析结果如表 4 所示。

表 4 损失率回归方程方差分析

Tab. 4 Variance analysis of loss rate regression equation

来源	平方和	自由度	F 值
回归	4.33	9	$F_2 = 7.68$
剩余	0.81	13	
失拟	0.33	5	
误差	0.17	8	$F_1 = 1.94$
总计	5.14	22	

查 F 表, $F_1 = 1.94 < F_{0.05}(5, 8) = 3.69$, 失拟项不显

著,说明失拟平方和中,其他不可忽略因素对试验结果的影响很小,方程拟合显著,可用统计量 F_2 对回归方程进行显著性检验。 $F_2 = 7.68 > F_{0.01}(9, 13) = 4.17$, F 检验的结果表明,由回归正交旋转设计所获得的回归方程与实际情况拟合良好,方程具有实际意义。经 t 检验,将不显著项剔除,可得回归方程为

$$y_1 = 1.28 + 0.42X_1 + 0.26X_1^2 + 0.11X_2^2 + 0.14X_3^2 + 0.19X_2X_3$$

(5)

用同样的方法得到破碎率、含杂率和脱粒功耗的回归方程,分别为

$$y_2 = 0.55 + 0.19X_1 + 0.03X_3 + 0.04X_1^2 + 0.04X_2^2 - 0.02X_1X_2 - 0.03X_1X_3$$

(6)

$$y_3 = 0.47 + 0.13X_1 - 0.04X_2 - 0.14X_3 + 0.04X_1^2 + 0.13X_2^2 + 0.06X_2X_3$$

(7)

$$y_4 = 14.52 + 1.95X_1 + 0.61X_2 + 0.33X_1^2 - 0.43X_3^2 - 0.13X_1X_3$$

(8)

3.2 试验因素对各指标的单因素效应分析

回归方程中含有 3 个变量,为了直观地找出各因素对各指标的影响,采用降维法将多元复杂问题转化为一元问题,即将 3 个因素中的 2 个因素取固定水平,观察剩余因素对各指标的影响。如在考察转速组合、高速段比例、叶片锥度对损失率的影响时,分别令回归方程式(5)中 $X_2 = X_3 = 0; X_1 = X_3 = 0; X_1 = X_2 = 0$,分别得到

$$y_1 = 1.28 + 0.42X_1 + 0.26X_1^2 \tag{9}$$

$$y_1 = 1.28 + 0.11X_2^2 \tag{10}$$

$$y_1 = 1.28 + 0.14X_3^2 \tag{11}$$

式(9)~(11)分别表示转速组合、高速滚筒比例、叶片锥度与损失率的关系,绘制各因素对损失率的影响曲线,如图 7 所示。

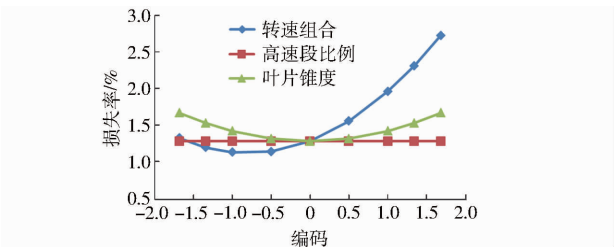


图 7 各因素对损失率的影响曲线
Fig. 7 Impact curves of each factor on loss rate

由图 7 可知,滚筒转速低时,损失较大,这是因为脱粒不完全,未脱净损失较大。当滚筒转速大于 -1 水平后,随着转速的增加,损失率变大,滚筒转速超过 1 水平时,趋势更明显,这是因为脱粒滚筒转速超过一定的范围后,籽粒破碎损失增加。当滚筒转速和滚筒长度配比一定时,随着风机叶片锥度的增加,损失率先降低后增加,在 0 水平时损失率最小,说明圆锥形风机产生的横向风能有效降低损失率,但随着风机叶片锥度的增加,横向风过大导致清选筛分布变差,有籽粒被吹出机外导致清选损失变大。影响损失率的各因素主次顺序分别为:转速组合、叶片锥度和高速滚筒比例。

根据上述方法,可得到转速组合、高速滚筒比例和叶片锥度分别与破碎率、含杂率和脱粒功耗的单因素影响曲线,如图 8~10 所示。

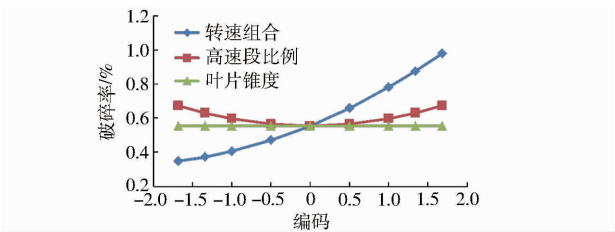


图 8 各因素对破碎率的影响曲线
Fig. 8 Impact curves of each factor on broken rate

由图 8 可知,滚筒转速组合与破碎率呈明显正

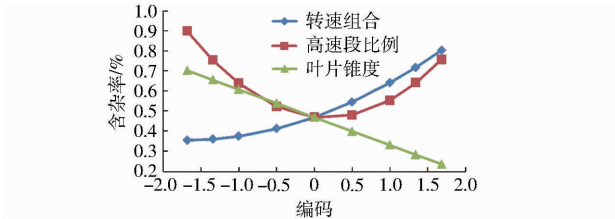


图 9 各因素对含杂率的影响曲线
Fig. 9 Impact curves of each factor on impurity rate

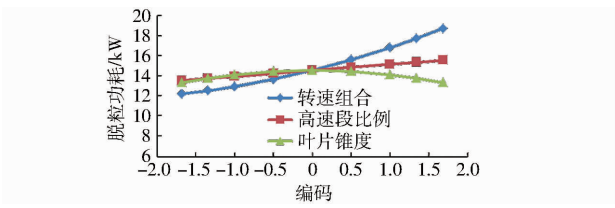


图 10 各因素对脱粒功耗的影响曲线
Fig. 10 Impact curves of each factor on threshing power

相关,即滚筒转速越高,破碎率越大;就高速滚筒段比例而言,高速滚筒段比例小时,破碎率较大,这是因为滚筒低转速影响了籽粒分离;随着高速段比例增加,破碎率变小,在 0 水平时破碎率最小,随后随着高速段比例的增加,破碎率升高,说明高低速滚筒长度配比对破碎率有较明显影响,且高速段比例不宜过小或过大,取值 0 水平较为合适;风机叶片锥度对破碎率的影响曲线趋于直线,说明风机叶片锥度对破碎率的影响很小。影响破碎率的各因素主次顺序分别为:转速组合、高速段比例和叶片锥度。

由图 9 可知,滚筒转速越高,含杂率越大,且转速组合 0 水平以上趋势更明显,表明随着滚筒转速的增大,脱粒空间内的碎茎叶增多,使籽粒含杂率升高;高速段比例小时,含杂率较大,随着高速段比例增加,含杂率变小,在 0 水平时含杂率最小,随后随着高速段比例的增加,含杂率升高,表明高速段比例不宜过小或过大,取值 0 水平较为合适;风机叶片锥度对含杂率的影响较显著,随着叶片锥度的变大,含杂率降低,表明圆锥形清选风机横向风对清选质量有重要作用。影响含杂率的各因素主次顺序分别为:转速组合、叶片锥度和高速段比例。

由图 10 可知,脱粒功耗随滚筒转速的增大而增加,同时也随高速段比例的增大而增加,但是两者相比,滚筒转速对脱粒功耗的影响更大;风机叶片锥度对脱粒功耗的影响不大,在叶片锥度 0 水平时,比其他水平略大。影响脱粒功耗的各因素主次顺序分别为:转速组合、高速段比例和叶片锥度。

3.3 试验因素对各指标的双因素效应分析

在三元二次回归方程中,固定其中一个因素,可得到另外 2 个因素与指标的回归子模型。在式(5)中,分别令 $X_3 = 0; X_2 = 0; X_1 = 0$,则损失率双因素方

程分别为

$$y_1(X_1,X_2)=1.28+0.42X_1+0.26X_1^2+0.11X_2^2$$
$$y_1(X_1,X_3)=1.28+0.42X_1+0.26X_1^2+0.14X_3^2$$
$$y_1(X_2,X_3)=1.28+0.11X_2^2+0.14X_3^2+0.19X_2X_3$$

采用曲面图方法描述 2 个因素对试验指标的影响,在 Matlab 中绘制试验指标的双因素影响曲面图,如图 11 所示。图 11a 为转速组合与高速段比例对损失率的双因素影响曲面,图 11b 为转速组合和叶片锥度对损失率的双因素影响曲面,图 11c 为高速段比例和叶片锥度对损失率的双因素影响曲面。

由图 11a 可知,在滚筒转速组合和高速段比例

的交互作用中,转速组合对损失率的影响较大,在转速组合 -1 水平和高速段比例 0 水平时,损失率最小;由图 11b 可知,在滚筒转速组合和风机叶片锥度的交互作用中,转速组合对损失率的影响较大,在转速组合 -1 水平和风机叶片锥度 0 水平时,损失率最小;由图 11c 可知,在高速段比例和风机叶片锥度的交互作用中,当两者均处于 0 水平时,损失率最小。

采用上述同样方法,可得到破碎率、含杂率、脱粒总功耗的双因素影响曲面,如图 12 ~ 14 所示。

由图 12a 可知,在滚筒转速组合和滚筒高速段比例的交互作用中,在高速段比例 0 水平时,破碎率

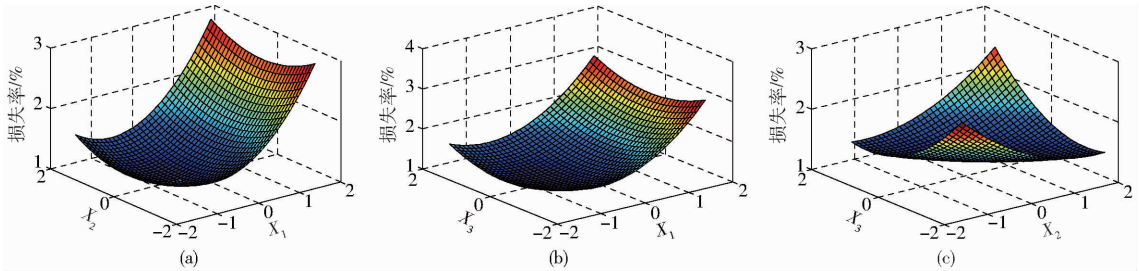


图 11 损失率双因素影响曲面
Fig. 11 Impact surfaces of double factors on loss rate

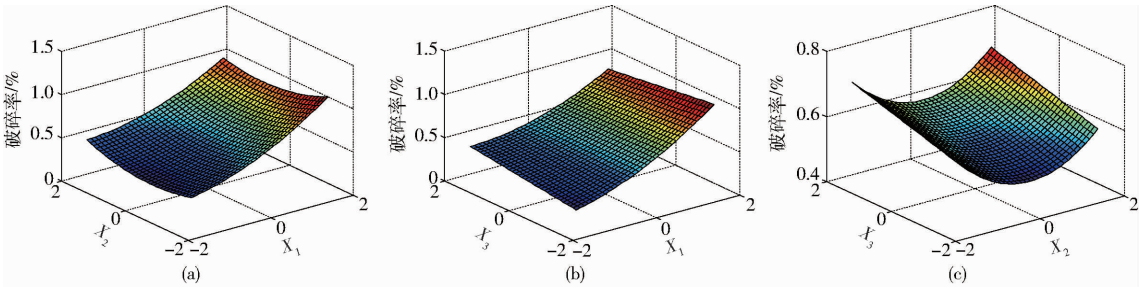


图 12 破碎率双因素影响曲面
Fig. 12 Impact surfaces of double factors on broken rate

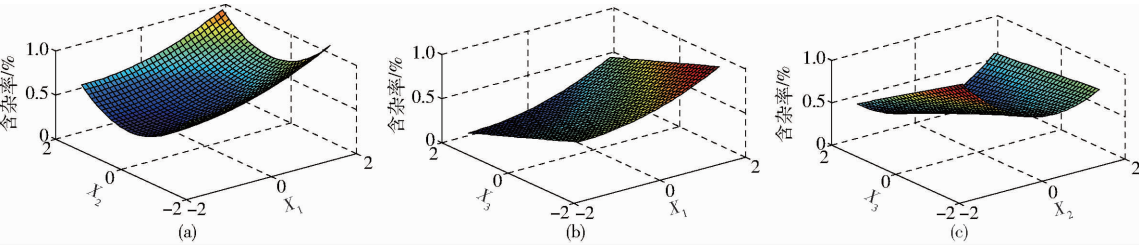


图 13 含杂率双因素影响曲面
Fig. 13 Impact surfaces of double factors on impurity rate

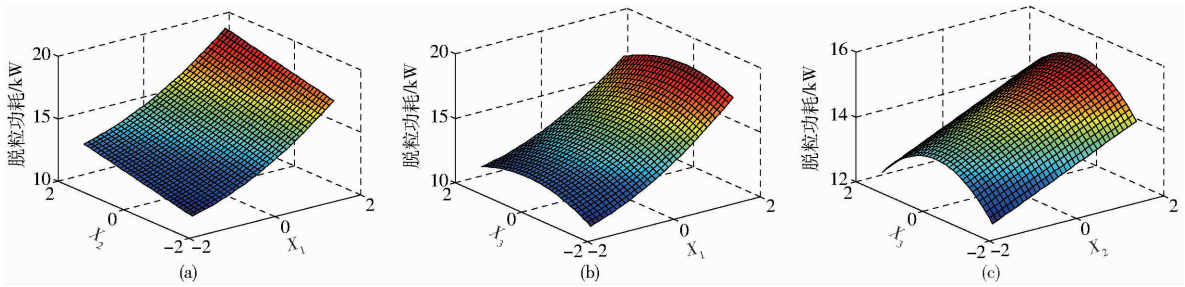


图 14 脱粒功耗双因素影响曲面
Fig. 14 Impact surfaces of double factors on threshing power

随转速增加而升高;由图 12b 可知,在滚筒转速组合和风机叶片锥度的交互作用中,滚筒转速组合对破碎率的影响较大,在转速较低时,破碎率随叶片锥度的增大而略有升高,在转速较高时,破碎率随叶片锥度的增大反而略有降低;由图 12c 可知,在高速段比例 0 水平(高速段滚筒比例 30%)和风机叶片锥度 -1.682 水平(叶片锥度 2.2°)时,破碎率最小,破碎率随风机叶片锥度的增大而升高。

由图 13a 可知,在滚筒转速组合和滚筒高速段比例的交互作用中,在高速段比例 0 水平时,含杂率随转速增加而升高,高速段比例和转速组合均为最大水平时,含杂率最大;由图 13b 可知,破碎率随转速增大而升高,随风机叶片锥度增大而降低;由图 13c 可知,风机叶片锥度和高速段比例最小水平时,含杂率最大,高速段比例 0 水平,叶片锥度最大水平时,含杂率最小。

由图 14a 可知,在滚筒转速组合和滚筒高速段比例的交互作用中,脱粒功耗与转速组合和高速段比例呈明显正相关;由图 14b 可知,在滚筒转速组合与风机叶片锥度的交互作用中,转速组合为主要因素;由图 14c 可知,风机叶片锥度 0 水平时,脱粒功耗随高速段比例的增大而增大。

3.4 性能指标优化与田间试验

损失率、破碎率、含杂率和脱粒功耗是评价脱分选装置工作性能的主要指标,在各自的约束条件下应达到最小值。根据已建立的损失率 y_1 、破碎率 y_2 、含杂率 y_3 、脱粒功耗 y_4 数学模型,使得

$$y_i = f(X_1, X_2, X_3) \rightarrow \min \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (12)$$

利用多目标优化的方法分析脱分选综合性能的最佳参数组合,利用 Matlab 中的优化工具箱 fgoalattain 函数求解多目标达到问题,约束条件为

$$\begin{cases} y_i \geq 0 \\ -1.682 \leq X_j \leq 1.682 \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3)$$

得横置差速轴流脱分选系统最佳组合参数方案为:转速组合 X_1 为 0.030 7,实际值为 773、876 r/min;高速段 X_2 为 -0.016 7,实际值为 29.5%;叶片锥度 X_3 为 1.679 1,实际值为 3.75°。根据试验设计各因素的水平变化幅度,将具体数值向接近值圆整靠近,最终选取三因素最佳参数组合方案为:转速组合 750、850 r/min,高速段比例 30%,叶片锥度 3.8°。可见,23 组试验方案中的第 14 组试验方案为最佳方案,此工况下,横置差速轴流脱分选系统综合工作性能最佳,其损失率为 1.57%,破碎率为 0.71%,含杂率为 0.38%,脱粒总功耗为 13.33 kW,低速滚筒平均功耗占脱粒分离总功耗的 59.3%,高速滚筒平均功耗占脱粒分离总功耗的 40.7%。根据文献[20],单

速滚筒脱粒分离功耗常规设计指标为 7.5~9.0 kW/kg。本次试验结果显示,差速滚筒脱粒分离总功耗为 5.65~9.91 kW/kg,平均值为 7.28 kW/kg,略低于常规设计指标。

为验证横置差速轴流脱分选系统的工作性能,2015 年 10 月,在浙江省永康市芝英镇进行了田间试验,如图 15 所示。试验在安装有横置差速轴流脱分选系统的全喂入式联合收获机上进行,其结构参数和工作参数取多目标优化所得最佳参数组合,即转速组合 750、850 r/min,高速段比例 30%,叶片锥度 3.8°。试验水稻品种和喂入量与台架试验一致,分别为“甬优 15”和 2 kg/s。田间试验结果如表 5 所示。结果表明,横置差速轴流脱分选总损失率、含杂率和破碎率 3 项工作性能指标均优于行业标准规定。



图 15 田间试验现场

Fig. 15 Photo of field experiment

表 5 田间试验结果

Tab. 5 Results of field experiment

检测项目	总损失率	含杂率	破碎率
标准要求	≤3.0	≤2.0	≤1.0
检测结果	1.78	0.44	0.65

4 结论

(1)对横置差速轴流脱分选系统试验台进行了多方案同轴差速脱粒分离、风筛式清选性能试验。同轴差速脱粒技术通过合理利用脱粒滚筒转速,解决损失率(脱不净与夹带)与破碎率的矛盾;圆锥形清选风机产生的横向风能有效均布振动筛面上的脱出物;2 项技术的应用能提高横置轴流脱分选系统的工作性能。

(2)影响横置差速轴流脱分选系统损失率、含杂率的 3 个因素主次顺序依次为差速滚筒转速组合、圆锥形风机叶片锥度、差速滚筒高低速段长度配比;影响横置差速轴流脱分选系统破碎率、脱粒功耗的 3 个因素主次顺序依次为差速滚筒转速组合、差速滚筒高低速段长度配比、圆锥形风机叶片锥度。

(3)最优参数组合为:差速滚筒转速组合 750、850 r/min,风机叶片锥度 3.8°,高速段比例 30%;对

应工作性能指标为: 损失率 1.57%、破碎率 0.71%、平均功耗占脱粒分离总功耗的 40.7%, 脱粒分离总含杂率 0.38%, 脱粒功耗 6.67 kW/kg, 其中, 低速滚筒平均功耗占脱粒分离总功耗的 59.3%, 高速滚筒功耗略低于常规设计指标。

参 考 文 献

- 1 衣淑娟, 陶桂香, 毛欣. 两种轴流脱粒分离装置脱出物分布规律对比试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 154–156.
YI Shujuan, TAO Guixiang, MAO Xin. Comparative experiment on the distribution regularities of threshed mixtures for two types of axial flow threshing and separating installation[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 154–156. (in Chinese)
- 2 孙大尉, 衣淑娟, 厉锐, 等. 轴流脱粒与分离装置的单因素试验研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2010, 22(1): 36–39.
SUN Dawei, YI Shujuan, LI Rui, et al. The experiment research of single-parameter of the axial flow threshing and separating unit[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2010, 22(1): 36–39. (in Chinese)
- 3 张彦河, 衣淑娟. 水稻不同脱粒装置脱粒性能的对比试验研究[J]. 农机化研究, 2011, 33(3): 146–150.
ZHANG Yanhe, YI Shujuan. Contrast testing research of rice threshing performance of different threshing device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(3): 146–150. (in Chinese)
- 4 徐立章, 李耀明, 张立功, 等. 轴流式脱粒-清选装置试验台的设计[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 85–88.
XU Lizhang, LI Yaoming, ZHANG Ligong, et al. Development on test-bed of axial threshing and cleaning unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 85–88. (in Chinese)
- 5 徐立章, 李耀明, 马朝兴, 等. 横轴流双滚筒脱粒分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 55–58.
XU Lizhang, LI Yaoming, MA Chaoxing, et al. Design and experiment of threshing and separating unit with double axial cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 55–58. (in Chinese)
- 6 李耀明, 许太白, 徐立章, 等. 多滚筒脱粒分离装置试验台[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 95–98.
LI Yaoming, XU Taibai, XU Lizhang, et al. Test-bed of threshing and separating unit with multi cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 95–98. (in Chinese)
- 7 李耀明, 王成红, 徐立章, 等. 切纵流联合收获机脱粒分离装置田间试验与参数优化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 111–116.
LI Yaoming, WANG Chenghong, XU Lizhang, et al. Parameter optimization and field test of threshing and separation device in tangential-longitudinal combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 111–116. (in Chinese)
- 8 徐立章, 李耀明, 王成红, 等. 切纵流双滚筒联合收获机脱粒分离装置[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 105–108, 135.
XU Lizhang, LI Yaoming, WANG Chenghong, et al. Combinational threshing and separating unit of a transverse tangential cylinder and an axial rotor of combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 105–108, 135. (in Chinese)
- 9 刘辉, 刘鹏程, 张建军, 等. 轴流式脱粒装置脱粒性能的试验研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(3): 176–179.
LIU Hui, LIU Pengcheng, ZHANG Jianjun, et al. Experimental research on threshing performance of axial flow threshing device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(3): 176–179. (in Chinese)
- 10 赵德春, 余涛, 蔡晓华. 纵轴流脱粒分离试验台的设计[J]. 农机化研究, 2010, 32(7): 121–123.
ZHAO Dechun, YU Tao, CAI Xiaohua. Design on ordinate axial threshing and separating test-bed[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(7): 121–123. (in Chinese)
- 11 戴飞, 高爱民, 孙伟, 等. 纵轴圆锥型滚筒脱粒装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 74–78.
DAI Fei, GAO Aimin, SUN Wei, et al. Design and experiment on longitudinal axial conical cylinder threshing unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 74–78. (in Chinese)
- 12 钟挺, 胡志超, 顾峰玮, 等. 4LZ-1.0Q 型稻麦联合收获机脱粒清选部件试验与优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 76–81.
ZHONG Ting, HU Zhichao, GU Fengwei, et al. Optimization and experiment for threshing and cleaning parts of 4LZ-1.0Q cereal combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 76–81. (in Chinese)
- 13 孟繁昌, 庞风斌, 叶耘, 等. 联合收获机水稻收获性能对比试验[J]. 农业机械学报, 2005, 36(5): 141–143.
- 14 MIU P I, HEINZ-DIETER Kutzbach. Mathematical model of material kinematics in an axial threshing unit[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 58(2): 93–99.
- 15 MIU P I, HEINZ-DIETER Kutzbach. Modeling and simulation of grain threshing and separation in threshing units—part I [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(1): 96–104.
- 16 陈霓, 熊永森, 陈德俊, 等. 联合收获机同轴差速轴流脱粒滚筒设计和试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 67–71.
CHEN Ni, XIONG Yongsan, CHEN Dejun, et al. Design and test on the coaxial differential-speed axial-flow threshing rotor of combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 67–71. (in Chinese)
- 17 陈霓, 黄东明, 陈德俊, 等. 风筛式清选装置非均匀气流清选原理与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 73–77.
CHEN Ni, HUANG Dongming, CHEN Dejun, et al. Theory and experiment on non-uniform air-flow cleaning of air-screen cleaning unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 73–77. (in Chinese)
- 18 陈德俊, 龚永坚, 黄东明, 等. 履带式全喂入稻麦联合收获机新型工作装置研究设计[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 82–85.
CHEN Dejun, GONG Yongjian, HUANG Dongming, et al. Development on some apparatus of Chinese model caterpillar rice-wheat combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 82–85. (in Chinese)
- 19 王万中. 试验的设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- 20 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册: 下册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.