

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.017

同轴双滚筒联合收获机设计与试验

田立权¹ 李红阳² 胡华东² 陈鹿冰² 熊永森¹ 金仁雕¹

(1. 金华职业技术学院机电工程学院, 金华 321017; 2. 浙江四方集团公司, 永康 322000)

摘要: 为了适应丘陵山区作业环境,满足超级杂交水稻收获要求,设计了4LZ-2.1Z型同轴双滚筒联合收获机。阐述了联合收获机整体设计方案,设计了同轴双速脱粒分离装置与履带自走装置,可一次完成分禾、扶禾、切割、脱粒、清选、装袋等工序。以低/高速脱粒滚筒线速度、回转式凹板筛速度和脱粒间隙为试验因素,籽粒损失率、破碎率和含杂率为性能指标,采用三因素五水平正交旋转组合设计试验,运用 Design-Expert 软件进行多目标变量优化,建立了各试验因素与性能指标数学模型,并进行多目标参数优化。根据参数优化结果,开展了样机田间试验。田间试验表明,该样机作业性能稳定,籽粒损失率、破碎率和含杂率分别为 1.34%、0.20% 和 0.40%,各项性能指标均优于检测标准要求。

关键词: 联合收获机; 全喂入; 同轴双速脱粒分离装置; 设计; 试验; 回归分析

中图分类号: S225.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0139-08

Design and Experiment on Coaxial Double Speed Threshing for Combine Harvester

TIAN Liqun¹ LI Hongyang² HU Huadong² CHEN Lubing² XIONG Yongsen¹ JIN Rendiao¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jinhua Polytechnic, Jinhua 321017, China

2. Zhejiang Sifang Group Corp, Yongkang 322000, China)

Abstract: According to the present situation of the low mechanization of field experiments and the lack of plot equipment in China, in order to adapt to the operating environment in hilly and mountainous areas and meet the harvest requirements of super hybrid rice, the 4LZ-2.1Z type combine harvester was developed. The integrated design of combine harvester and double-speed double-action threshing and separating unit was introduced. The grain plot combine had the functions of holding and dividing grain stems, cutting grain stems, threshing and cleaning of grain and bagging seeds. Low/high speed threshing drum speed, rotary concave screen speed and threshing gap were used as test factors, and grain loss rate, broken rate and impurity rate were used as performance indexes. The experiment was designed by three-factor five-level orthogonal rotation combination. The Design-Expert software was used to optimize multi-objective variables, the mathematical model of each test factor and performance index were established, and the multi-objective parameters were optimized. According to the results of parameter optimization, field test of prototype was carried out. Field experiments showed that the performance of the prototype was stable, and the grain loss rate, broken rate and impurity rate were 1.34%, 0.20% and 0.40%, respectively. With each performance index superior to the test standard, this device solved the contradiction between impurity removal, entrapment and grain breakage loss during the harvest of "Yongyou 15" super hybrid rice effectively. This study was of benefit to improving the efficiency and precision of plant field experiments.

Key words: combine harvester; full feeding; coaxial double speed threshing and separating device; design; test; regression analysis

收稿日期: 2020-08-03 修回日期: 2020-09-11

基金项目: 浙江省公益性技术应用研究项目(LGN20E050005)和金华市科技研究项目(2018-2-005)

作者简介: 田立权(1979—),男,副教授,博士,主要从事田间机械研究,E-mail: tlqbuct@sohu.com

通信作者: 熊永森(1969—),男,教授,主要从事田间机械及机械可靠性研究,E-mail: jhxsy@163.com

0 引言

我国南部丘陵山区因地形地貌限制,水田地块面积小、分散度高,水稻生产劳动强度大、效率低,种植环境不适合大型水稻联合收获机作业^[1]。随着水稻生产技术不断提高,超级杂交水稻大面积推广种植,超级杂交水稻具有单产高、长势密、茎秆粗、草谷比大、茎秆含水率高等特性^[2-4],这些特性对中小型联合收获机作业性能提出了更高的要求^[5-6]。

为了推进丘陵山区水稻收获机械化进程,国内外学者和相关企业进行了大量研究。ALIZADEH等^[7]研究了轴流式谷物脱粒机脱粒滚筒速度和谷物含水率对破碎率的影响,结果表明在脱粒滚筒转速 550 r/min、水稻含水率 23% 时,破碎率最低;MOHTASEBI等^[8]开展了脱粒滚筒不同结构类型及钉齿不同排列方式对脱粒性能影响的研究;任述光等^[9]设计了 4LZ-0.8 型水稻联合收获机,脱粒滚筒类型为横轴流钉齿式,该机型利用旋风分离器作为清选装置,作业效率为 0.12 hm²/h,含杂率为 1.8%,破碎率为 0.2%,总损失率为 2.0%;熊永森等^[10]设计了小型全喂入双滚筒横轴流联合收获机,并与同型联合收获机单滚筒轴流脱粒装置进行对比试验,相同喂入量比单滚筒夹带损失率降低了 39%;顾峰玮等^[11]设计了轻筒型稻麦联合收获机,采用单横轴流钉齿型单滚筒加栅条凹板筛配置,水稻收获含杂率为 0.6%、破碎率为 1%,但整机结构尺寸偏大,对小田块的适应能力有限。由于丘陵山区水田地块条件制约,联合收获机结构尺寸和动力受到限制,国内现有小型水稻联合收获机多为横置轴流单滚筒脱粒分离装置,存在脱粒分离不净和夹带损失较大等不足^[12-13]。随着超级杂交水稻种植在丘陵山区逐步推广,开发具有新型脱粒分离装置的中小型联合收获机十分必要。

本文结合丘陵山区水稻种植模式和农艺要求,设计 4LZ-2.1Z 型全喂入水稻联合收获机,该机脱分装置主要由纵轴流同轴双速脱粒滚筒和回转式凹板筛构成,履带自走装置为液压马达驱动原地转向行走装置,探究同轴双速脱粒分离装置对提高脱分性能、降低籽粒损失的综合效能,并依据相关标准对样机主要性能指标进行试验测定。

1 整机结构与工作原理

4LZ-2.1Z 型联合收获机采用全喂入收获方式和履带自走装置,总体结构如图 1 所示。整机主要由同轴双速脱粒滚筒、回转式凹板筛、清选装置、履带自走装置、喂入装置、输送装置、操纵装置、拨禾

轮、分禾器等组成。

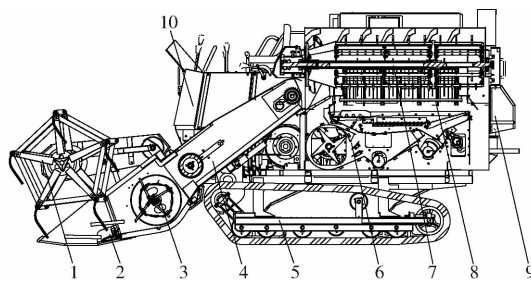


图 1 4LZ-2.1Z 型联合收获机结构简图

Fig.1 Structure diagram of 4LZ-2.1Z combine harvester

1. 拨禾轮 2. 分禾器 3. 喂入装置 4. 输送装置 5. 履带自走装置 6. 清选装置 7. 同轴双速脱粒滚筒 8. 回转式凹板筛 9. 排草口 10. 操纵装置

田间作业过程中,分禾器将幅宽内的水稻植株分开扶起,同时在拨禾轮的扶持推送下,水稻植株被切割,经割台输送装置和喂入装置,水稻茎秆及掉落的籽粒被一起喂入同轴双速脱粒分离装置。稻株首先经过低速滚筒脱粒分离,再由高速滚筒脱粒分离。利用低速滚筒脱粒分离,降低籽粒破碎损失;利用高速滚筒脱粒分离,降低脱不净损失并提高籽粒与茎秆分离效率。籽粒经过回转式凹板筛,凹板筛循环运转,筛面不会积留籽粒或茎叶(尤其带露水作业),防止凹板筛栅格孔堵塞,籽粒通过凹板筛上筛面落到下筛面过程,凹板筛循环运转,使籽粒均匀撒布在清选装置筛面,有利于提高后续清选性能;长茎秆及其他杂余等经过纵轴流滚筒尾部排草板,由排草口排出。

机器主要设计技术参数如表 1 所示。

表 1 4LZ-2.1Z 型联合收获机主要设计技术参数
Tab.1 Design parameters of 4LZ-2.1Z plot grain combine harvester

| 参数 | 数值/形式 |
|---|-------------------|
| 结构形式 | 全喂入履带自走式 |
| 外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm) | 3 980×1 880×1 950 |
| 脱粒滚筒形式 | 纵置轴流双速钉齿式 |
| 凹板筛形式 | 回转式栅格 |
| 额定功率/kW | 36.8 |
| 割台宽度/mm | 1 780 |
| 作业速度/(m·s ⁻¹) | 0~5.3 |
| 生产率/(hm ² ·h ⁻¹) | 0.1~0.3 |
| 含杂率(设计值)/% | ≤2.00 |
| 破碎率(设计值)/% | ≤1.50 |
| 损失率(设计值)/% | ≤2.80 |
| 喂入量/(kg·s ⁻¹) | 2.10 |

2 关键部件设计

2.1 履带自走装置

为了解决丘陵山区水田地块小,联合收获机地

头频繁转向耗时, 占用作业时间比例大, 降低转向时对地表的破坏, 开发了液压马达驱动原地转向行走装置, 其结构如图 2 所示。

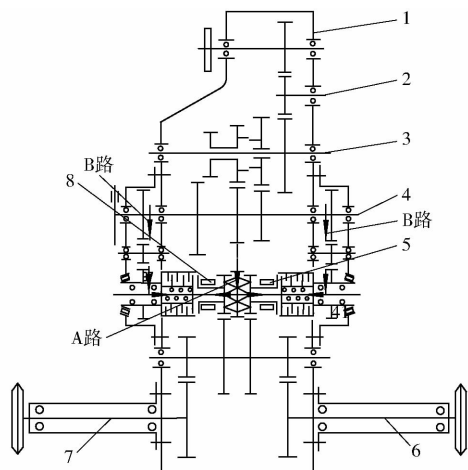


图 2 原地转向结构示意图

Fig. 2 In-situ steering gear box structure schematic

1. 变速箱体 2. 液压马达输入轴 3. 副变速轴 (I 轴) 4. 副变速轴 (II 轴) 5. 右拨叉 6. 右驱动轴 7. 左驱动轴 8. 左拨叉

液压马达动力输入变速箱后, 将其分为 A、B 两路正反动力流, A 路正转动力流由驱动齿轮经中央传动齿轮及两侧牙嵌离合器齿轮向两侧 (或一侧) 传送正转动力; B 路反转动力流与驱动齿轮位于同轴右侧或左侧反转驱动齿轮驱动, 经换向齿轮和离合器齿轮, 向右侧或左侧传送反转动力。联合收获机需要左右转向微调时, 切断对应 A、B 路动力流即可完成; 收获机需要实现紧急转向时, 需先切断动力流, 然后制动对应的输出齿轮。当向右原地转向时, 只需操纵右拨叉向右倾斜, 使右侧离合器与中央传动齿轮分离, 与右侧反转离合器结合, 反转动力即由右侧牙嵌离合器齿轮经动齿轮使右驱动轮反向运转。由于驱动齿轮与右反转驱动齿轮齿数相等, 中央传动齿轮和右反转离合器齿轮齿数相等, 故可使左右驱动轮转速相等、方向相反, 实现联合收获机向右原地转向。

2.2 同轴双速脱粒滚筒

同轴双速脱粒滚筒主要由喂入段、低速脱粒段、高速脱粒段、中间装置、低速滚筒轴、高速滚筒轴等组成, 如图 3 所示。双速脱粒滚筒均由辐板、齿杆 (共 6 根)、钉齿 (共 81 根) 组成, 其中喂入螺旋与低速脱粒滚筒固结; 低速滚筒轴为空心结构, 高速滚筒轴借助轴承套装在低速滚筒轴内; 双速脱粒滚筒锥齿轮安置在喂入段左侧, 分别与低/高速滚筒轴固结, 以不同传动比分别驱动低/高速脱粒滚筒。设计滚筒脱粒部分长度为 1 500 mm, 其中滚筒脱粒部分长度的 2/3 为低速脱粒段, 1/3 为高速脱粒段, 两段脱粒滚筒连接处设置中间装置^[14]。

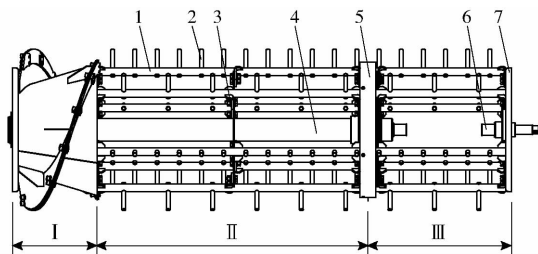


图 3 同轴双速脱粒滚筒结构关系图

Fig. 3 Head-feed coaxial differential speed threshing rotor

1. 齿杆 2. 钉齿 3. 辐板 4. 低速滚筒轴 5. 中间装置 6. 高速滚筒轴 7. 连接板 I. 喂入段 II. 低速脱粒段 III. 高速脱粒段

2.2.1 同轴双速脱粒滚筒线速度

低/高速脱粒滚筒主要依靠钉齿配合回转式凹板筛作用于稻穗, 籽粒获得能量与穗头产生分离, 从而实现脱粒分离。依据国内外学者建立的籽粒连接力与脱粒线速度之间的数学模型^[15-16], 确定低/高速滚筒线速度关系为

$$n_2 = kn_1 \quad (1)$$

式中 n_1 ——低速脱粒滚筒线速度, m/s

n_2 ——高速脱粒滚筒线速度, m/s

k ——脱粒滚筒所需最低线速度和可用最高线速度比值, 取 1.2

由同轴双速脱粒分离装置工作原理可知, 脱粒滚筒线速度较低时, 钉齿对籽粒作用力减弱, 连接力大的籽粒不易脱粒分离; 而线速度较高时, 钉齿对籽粒的作用力增强, 但易导致籽粒破碎。

2.2.2 脱粒滚筒直径

脱粒滚筒直径增大时, 凹板筛有效分离面积增大, 滚筒脱粒分离能力和生产率有极大提高; 但随着脱粒滚筒直径增大, 脱分装置体积和质量也相应增加, 整机功耗增加。因此, 确定纵轴流脱粒滚筒直径为

$$D = \frac{MN}{\pi} + 2h \quad (2)$$

式中 D ——脱粒滚筒齿顶圆直径, mm

h ——脱粒滚筒钉齿高度, 取 65 mm

N ——齿杆间距, mm

M ——齿杆数量, 个

考虑到同轴双速脱粒分离装置脱粒滚筒纵向布置, 为了尽可能增大回转式凹板筛面积, 确定脱粒滚筒齿顶圆直径为 520 mm。

2.3 回转式凹板筛

回转式凹板筛是同轴双速脱粒分离装置重要组成部分, 回转式凹板筛结构如图 4 所示。凹板栅条安装在弧形凹板筛架上, 凹板栅条内芯为直径 6 mm 钢丝, 外套内径 8 mm 钢管并可绕内芯转动, 凹板

筛架下部固定若干支撑横轴,凹板栅条穿过多条凹板栅条链,并由驱动轮带动循环运转,动力由高速脱粒滚筒提供,形成上下两层间距为 80 mm 的活动栅格。

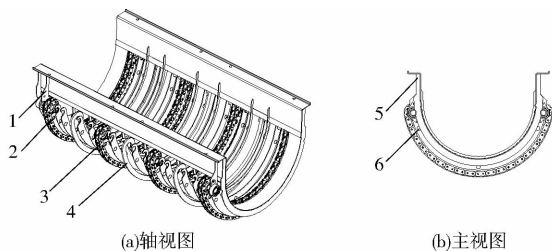


图4 回转式凹板筛结构示意图

Fig. 4 Structures ketches of moving grate concave

1. 下定型片 2. 凹板栅条 3. 凹板栅条链 4. 凹板筛架 5. 上定型片 6. 横轴

2.3.1 凹板筛栅格尺寸

凹板筛架下部固定有若干横轴,等间距穿接并固定下定型片,下定型片厚度为 3.0 mm;凹板筛架上部固定若干上定型片,厚度为 3.0 mm,上定型片与下定型片形成的径向空间即为凹板栅条运行轨道。在凹板栅条两端和中部,分别穿过多组凹板栅条链,其中心距为 19.05 mm,构成环形回转的凹板筛面。回转式凹板筛上定型片、下定型片、凹板栅条链和凹板栅条形成一系列宽为 11.00 mm、长为 50.00 mm 的活动栅格^[17-18]。凹板筛回转运行时,凹板栅条链带动栅条内芯,在上定型片与下定型片间循环运行,保证了脱粒间隙稳定不变。

2.3.2 凹板筛包角和面积

全喂入联合收获机同轴双速脱粒分离装置主要依靠脱粒滚筒和凹板筛对稻株作用完成脱粒和分离,因此其生产率除与脱分装置结构有关外,也取决于脱粒滚筒和凹板筛的作用面积(即回转式凹板筛包围面积)。喂入量计算式为

$$Q = \eta S = BR\beta\eta \quad (3)$$

式中 S ——回转式凹板筛包围面积, m^2

η ——凹板筛单位面积生产率,取 $1.68 \text{ kg}/(m^2 \cdot s)$

Q ——喂入量,取 $2.10 \text{ kg}/s$

B ——脱粒滚筒总长度,取 1.50 m

R ——脱粒滚筒半径,取 0.26 m

β ——凹板筛包角, rad

将相关数值代入式(3),可求得回转式凹板筛包围面积为 1.25 m^2 ;凹板筛包角为 3.21 rad (183.6°),取整为 180° 。

回转式凹板筛上筛面线速度方向与脱粒钉齿线速度方向相同。凹板筛循环运转,上筛面不会积留籽粒或碎茎叶;脱出物通过凹板筛上筛面,穿过凹板

筛下筛面,均匀撒布在振动筛面,有利于脱出物进一步清选。

3 性能试验

物料喂入量、脱粒间隙、作物含水率和脱粒滚筒线速度是影响脱粒分离装置性能的重要参数^[19-20],为探究双速脱粒滚筒线速度、回转式凹板筛速度和脱粒间隙等参数对同轴双速脱粒分离装置工作性能(损失率、破碎率、含杂率)的影响,设计了同轴双速脱粒分离试验台架,采用二次旋转组合设计进行脱粒分离装置性能试验。

3.1 试验条件

脱粒分离试验台架主要由稻株输送台、同轴双速脱粒分离装置、调速电动机及控制台等组成,如图5所示。稻株输送台为高度可调传送带,输送速度为 $0 \sim 3 \text{ m}/s$ (无级调速);调速电动机功率为 15 kW ,脱粒滚筒线速度无级可调;回转式凹板筛驱动电动机功率为 2 kW ,各电动机通过变频控制台调节,并由采集系统对相关数据进行统计。

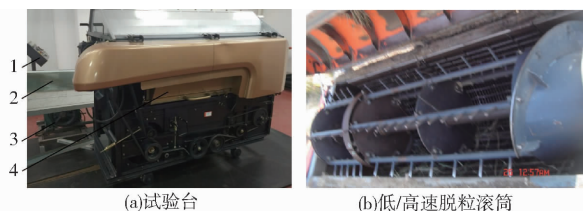


图5 脱粒分离试验台架

Fig. 5 Test bed for threshing and separating

1. 控制台 2. 传送带 3. 电动机 4. 同轴双速脱粒分离装置

试验物料为浙江省广泛种植的“甬优15号”超级杂交水稻,喂入量为 $2.10 \text{ kg}/s$,水稻部分特性如表2所示。

表2 水稻部分特性参数

Tab. 2 Basic properties of rice

| 参数 | 数值/形式 |
|--|-------------|
| 作物自然高度/cm | 150.4 |
| 作物成熟期 | 黄熟期 |
| 作物倒伏程度 | 直立无倒伏 |
| 籽粒含水率/% | 18.2 |
| 千粒质量/g | 30.2 |
| 割茬高度/cm | 42.5 |
| 草谷比 | 2.4 |
| 测区平均单产/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ | 2.1 |
| 穗长/cm | 17.5 ~ 26.4 |

3.2 性能指标

根据喂入量和草谷比,计算每次试验所得籽粒总质量,记为 W ;接粮口取样,记总质量 W_1 ;手工挑选破碎籽粒、杂质分别称量,记为 W_p 、 W_2 。由清选室

出口和排草箱收集排出物,挑选籽粒和含籽粒断穗称量,记为清选损失 W_q 和夹带损失 W_j 。则籽粒损失率 y_1 、破碎率 y_2 和含杂率 y_3 计算式为

$$y_1 = \frac{W_q + W_j}{W} \times 100\% \quad (4)$$

$$y_2 = \frac{W_p}{W_1} \times 100\% \quad (5)$$

$$y_3 = \frac{W_z}{W_1} \times 100\% \quad (6)$$

3.3 试验内容与方法

依据作业实际和单因素预试验合理控制各因素变化范围。在此基础上,采用三因素旋转正交组合设计试验^[21-22],试验因素编码如表 3 所示。

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Levels of experimental factors

| 编码 | 因素 | | |
|--------|------------------------------------|---------------------------------|---------------|
| | 低/高速脱粒滚筒线速度 $x_1/(m \cdot s^{-1})$ | 回转式凹板筛速度 $x_2/(m \cdot s^{-1})$ | 脱粒间隙 x_3/mm |
| | 1.682 | 22.92/27.50 | 1.60 |
| 1 | 21.40/25.68 | 1.36 | 27.16 |
| 0 | 19.17/23.00 | 1.00 | 23.00 |
| -1 | 16.94/20.32 | 0.64 | 18.84 |
| -1.682 | 15.42/18.50 | 0.40 | 16.00 |

根据试验数据进行结果分析,并对影响脱分性能指标的主要因素进行显著性分析,探求同轴双速脱粒分离装置最优工作参数组合,具体试验方案和结果如表 4 所示。

3.4 试验结果分析

采用 Design-Expert 6.0.10 软件进行试验数据回归分析,得到回归方程为

$$y_1 = 8.613 - 0.758x_1 - 0.780x_2 + 0.085x_3 - 0.037x_1x_2 - 0.012x_1x_3 - 0.021x_2x_3 + 0.023x_1^2 + 1.023x_2^2 + 0.005x_3^2 \quad (7)$$

表 4 试验方案与结果

Tab. 4 Schemes and results of tests

| 序号 | 试验因素 | | | 性能指标/% | | |
|----|------------------------|------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| | $x_1/(m \cdot s^{-1})$ | $x_2/(m \cdot s^{-1})$ | x_3/mm | 损失率 y_1 | 破碎率 y_2 | 含杂率 y_3 |
| 1 | 16.94/20.32 | 0.64 | 18.84 | 1.19 | 0.37 | 0.57 |
| 2 | 21.40/25.68 | 0.64 | 18.84 | 1.56 | 0.69 | 0.63 |
| 3 | 16.94/20.32 | 1.36 | 18.84 | 1.31 | 0.35 | 0.57 |
| 4 | 21.40/25.68 | 1.36 | 18.84 | 1.52 | 0.75 | 1.08 |
| 5 | 16.94/20.32 | 0.64 | 27.16 | 1.91 | 0.11 | 0.52 |
| 6 | 21.40/25.68 | 0.64 | 27.16 | 1.75 | 0.26 | 0.47 |
| 7 | 16.94/20.32 | 1.36 | 27.16 | 1.88 | 0.18 | 0.45 |
| 8 | 21.40/25.68 | 1.36 | 27.16 | 1.60 | 0.28 | 0.75 |
| 9 | 15.42/18.50 | 1.00 | 23.00 | 1.61 | 0.22 | 0.42 |
| 10 | 22.92/27.50 | 1.00 | 23.00 | 1.94 | 0.64 | 0.78 |
| 11 | 19.17/23.00 | 0.40 | 23.00 | 1.74 | 0.21 | 0.49 |
| 12 | 19.17/23.00 | 1.60 | 23.00 | 1.60 | 0.25 | 0.50 |
| 13 | 19.17/23.00 | 1.00 | 16.00 | 1.19 | 0.75 | 0.90 |
| 14 | 19.17/23.00 | 1.00 | 30.00 | 1.95 | 0.11 | 0.43 |
| 15 | 19.17/23.00 | 1.00 | 23.00 | 1.03 | 0.22 | 0.27 |
| 16 | 19.17/23.00 | 1.00 | 23.00 | 1.28 | 0.10 | 0.31 |
| 17 | 19.17/23.00 | 1.00 | 23.00 | 1.38 | 0.11 | 0.29 |
| 18 | 19.17/23.00 | 1.00 | 23.00 | 1.29 | 0.17 | 0.29 |
| 19 | 19.17/23.00 | 1.00 | 23.00 | 1.17 | 0.18 | 0.28 |
| 20 | 19.17/23.00 | 1.00 | 23.00 | 1.30 | 0.12 | 0.21 |
| 21 | 19.17/23.00 | 1.00 | 23.00 | 1.11 | 0.11 | 0.23 |
| 22 | 19.17/23.00 | 1.00 | 23.00 | 1.32 | 0.19 | 0.35 |
| 23 | 19.17/23.00 | 1.00 | 23.00 | 1.25 | 0.21 | 0.52 |

$$y_2 = 7.783 - 0.461x_1 - 0.570x_2 - 0.182x_3 + 0.005x_1x_2 - 0.005x_1x_3 + 0.003x_2x_3 + 0.014x_1^2 + 0.205x_2^2 + 0.006x_3^2 \quad (8)$$

$$y_3 = 12.494 - 0.681x_1 - 2.916x_2 - 0.272x_3 + 0.104x_1x_2 - 0.004x_1x_3 - 0.021x_2x_3 + 0.015x_1^2 + 0.569x_2^2 + 0.008x_3^2 \quad (9)$$

分析各试验因素变化对性能指标响应值影响显著性程度,破碎率、含杂率和损失率方差分析结果如表 5 所示。

表 5 破碎率、含杂率和损失率方差分析

Tab. 5 Analysis of variance for breakage rate, impurity rate and loss rate

| 来源 | 自由度 | 破碎率 | | 含杂率 | | 损失率 | |
|----------|-----|---------|------------|-------|-----------|-------|------------|
| | | 均方 | P | 均方 | P | 均方 | P |
| x_1 | 1 | 0.20 | <0.000 1** | 0.15 | 0.000 6** | 0.035 | 0.119 7 |
| x_2 | 1 | 0.003 | 0.224 4 | 0.032 | 0.062 4 | 0.008 | 0.445 5 |
| x_3 | 1 | 0.42 | <0.000 1** | 0.15 | 0.000 6** | 0.59 | <0.000 1** |
| x_1x_2 | 1 | 0.000 2 | 0.730 5 | 0.079 | 0.006 8** | 0.010 | 0.397 2 |
| x_1x_3 | 1 | 0.027 | 0.001 2** | 0.013 | 0.208 9 | 0.13 | 0.006 8** |
| x_2x_3 | 1 | 0.000 2 | 0.730 5 | 0.008 | 0.336 3 | 0.008 | 0.442 5 |
| 误差 | 8 | 0.002 | | 0.008 | | 0.013 | |
| 合计 | 14 | | | | | | |

注:**表示极显著性差异($P < 0.01$)。

为直观研究各参数与脱粒分离性能指标间关系,运用 Design-Expert 6.0.10 软件得到响应曲面,

为方便显示,图 6a、6b、6d、6e、6g、6h 只列出高速脱粒滚筒线速度。

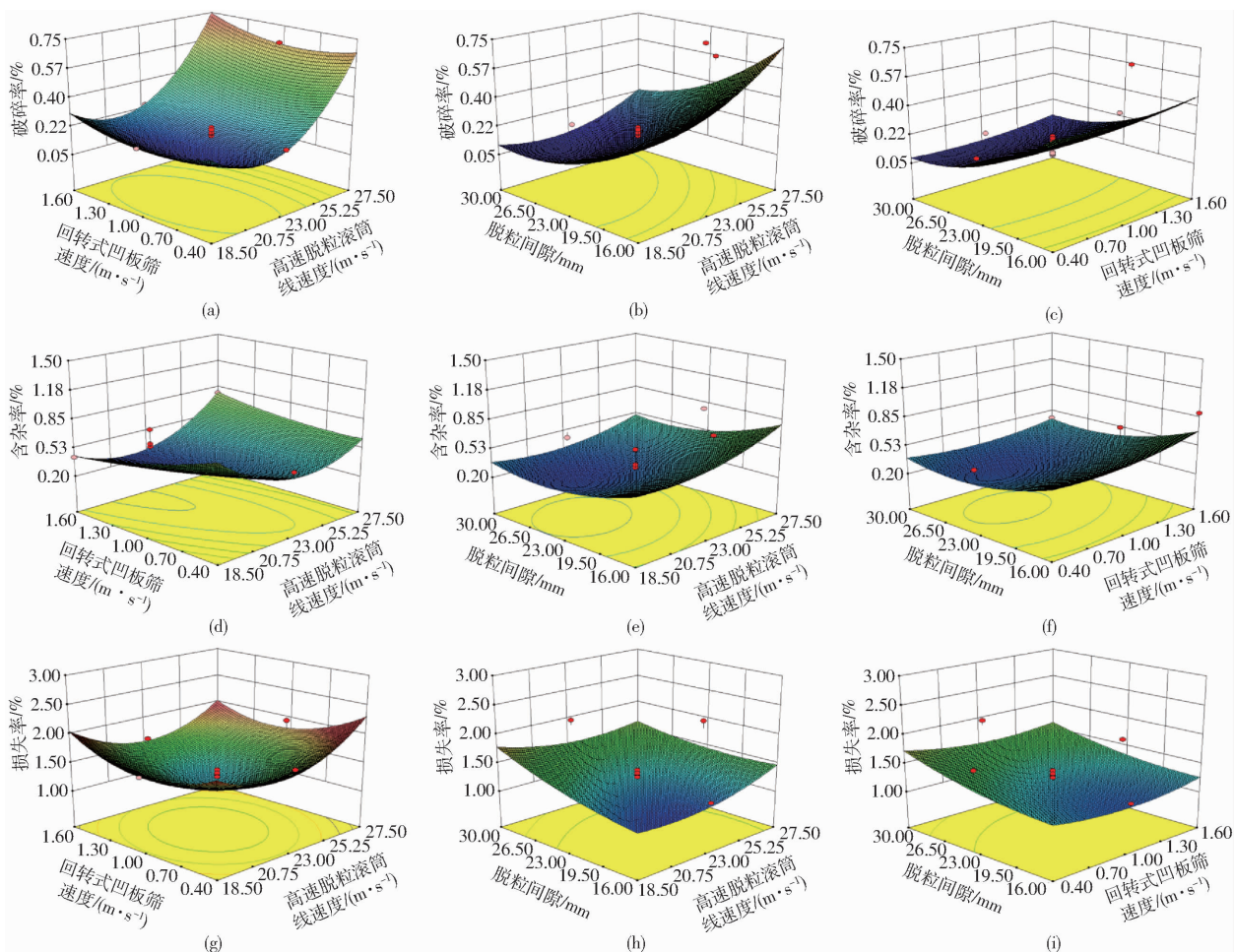


图6 各因素对性能指标影响的响应曲面

Fig.6 Response surfaces of all factors on seeding qualified index

由表5与图6a~6c可知,低/高速脱粒滚筒线速度($P < 0.0001$)与脱粒间隙($P < 0.0001$)对破碎率影响极显著,二者交互作用对破碎率影响显著($P = 0.0012$),随着低/高速脱粒滚筒线速度增加,籽粒破碎率逐渐增大,分析原因可能为脱粒滚筒线速度较高时,脱粒元件对籽粒的打击频率增高、打击强度增大,破碎籽粒的概率也相应增加;随着脱粒间隙增加,籽粒破碎率逐渐减小,分析原因可能为脱粒间隙较大时,物料在同轴双速脱粒分离装置内受到的回转式凹板筛、低/高速脱粒滚筒等对物料挤压作用较小,且物料层相对较厚,脱粒元件对籽粒打击频率降低,故籽粒的破碎率较低。

由表5与图6d~6f可知,低/高速脱粒滚筒线速度与回转式凹板筛速度的交互作用对含杂率影响极显著($P = 0.0068$)。随着低/高速脱粒滚筒线速度和回转式凹板筛速度增加,脱粒元件对物料打击强度增大,脱粒装置内碎茎叶增多,虽然凹板筛循环运转使籽粒快速分离,但二者交互作用中,低/高速脱粒滚筒线速度对含杂率影响极显著($P = 0.0006$),导致含杂率仍逐渐增加。

由表5与图6g~6i可知,低/高速脱粒滚筒线

速度与脱粒间隙的交互作用对损失率影响极显著($P = 0.0068$)。随着脱粒间隙增大,低/高速脱粒滚筒线速度减低,籽粒未脱净损失和夹带损失呈缓慢上升趋势,损失率较高;脱粒间隙减小,低/高速脱粒滚筒线速度增加,物料在脱粒分离装置内受到的凹板筛、脱粒滚筒等对物料的反作用力较大,物料层被压得较薄,脱粒元件对籽粒的打击作用增强,故破碎率较高,损失率仍相对较高。

3.5 性能指标优化

脱粒损失率、破碎率、含杂率是评价同轴双速脱粒分离选装置性能的重要指标,在各自约束条件下应达到最小值。为得到约束条件下最优组合,采用多目标变量优化方法,结合各因素边界条件,建立非线性参数模型为

$$\begin{cases} \min y_1 \\ \min y_2 \\ \min y_3 \\ \text{s. t.} \begin{cases} 15.42/18.50 \text{ m/s} \leq x_1 \leq 22.92/27.50 \text{ m/s} \\ 0.40 \text{ m/s} \leq x_2 \leq 1.60 \text{ m/s} \\ 16.00 \text{ mm} \leq x_3 \leq 30.00 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

基于 Design-Expert 6.0.10 软件 Optimization 模块进行多目标参数优化,得到低/高速脱粒滚筒线速度为 18.36/21.99 m/s、回转式凹板筛速度为 0.99 m/s 和脱粒间隙为 22.60 mm 时,对应的籽粒损失率、破碎率和含杂率分别为 1.22%、0.14% 和 0.29%。

4 田间试验

4.1 试验条件与方法

为验证同轴双速脱粒分离装置工作性能,2019 年 10 月委托浙江省机电产品质量检测所对安装同轴双速脱粒分离装置的 4LZ-2.1Z 型联合收获机进行样机检测,如图 7 所示,其脱分装置结构参数和工作参数为性能试验所得优化参数组合。试验地点为金华市下谢村水稻试验基地,试验品种和喂入量与性能试验一致。



图 7 样机田间试验

Fig.7 Field trials scene

试验方法依照 GB/T 10395.7—2006《农林拖拉机和机械 安全技术要求 第 7 部分:联合收获机、饲料和棉花收获机》、机械行业标准 JB/T 5117—2017《全喂入联合收割机 技术条件》和 GB/T 8097—

2008《收获机械 联合收割机 试验方法》规定,分别测试了损失率、破碎率和含杂率 3 个指标。

4.2 试验结果与分析

处理试验数据,得到 4LZ-2.1Z 型联合收获机性能指标如表 6 所示。

表 6 田间试验结果

Tab.6 Results of field experiment

| 检测项目 | 损失率 | 含杂率 | 破碎率 |
|------|-------|-------|-------|
| 标准要求 | ≤2.80 | ≤2.00 | ≤1.50 |
| 检测结果 | 1.34 | 0.40 | 0.20 |

结果表明,安装同轴双速脱粒分离装置的 4LZ-2.1Z 型联合收获机籽粒损失率、含杂率和破碎率 3 项性能指标均优于检测标准要求。

5 结论

(1)设计的同轴双速脱粒分离装置采用低速滚筒脱粒降低籽粒破碎损失、高速滚筒脱粒降低未脱净损失和夹带损失、凹板筛循环运转使籽粒快速分离,通过二次旋转组合设计台架试验得到低/高速脱粒滚筒线速度为 18.36/21.99 m/s、回转式凹板筛速度为 0.99 m/s 和脱粒间隙为 22.60 mm 时,对应的籽粒损失率、含杂率和破碎率分别为 1.22%、0.29% 和 0.14%。

(2)设计的 4LZ-2.1Z 型联合收获机能够一次实现水稻扶禾、切割、喂入、脱粒、清选等功能,满足了丘陵山区水稻收获要求,田间收获试验得到联合收获机籽粒损失率、含杂率和破碎率分别为 1.34%、0.40% 和 0.20%,各项性能指标均优于检测标准要求。

参 考 文 献

- [1] 王岳,杨林,韩增德. 试论南方水稻收获工艺和联合收获机选型[J]. 农业机械学报,1997,28(1):140-145.
WANG Yue, YANG Lin, HAN Zengde. Trial discussion about the technology of southern rice harvesting and the problem of selecting combine harvester model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1997, 28(1):140-145. (in Chinese)
- [2] 许阳东,朱宽宇,章星传,等. 绿色超级稻品种的农艺与生理性状分析[J]. 作物学报,2019,45(1):70-80.
XU Yangdong, ZHU Kuanyu, ZHANG Xingchuan, et al. Analysis in agronomic and physiological traits of green super rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(1):70-80. (in Chinese)
- [3] 郝树荣,董博豪,周鹏,等. 水分胁迫对超级稻生长发育和抗倒伏能力的影响[J]. 灌溉排水学报,2018,37(9):1-8.
HAO Shurong, DONG Bohao, ZHOU Peng, et al. The effects of water stress on growth and resistance of super rice against lodging[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018,37(9):1-8. (in Chinese)
- [4] 魏纯才,李耀明,徐立章,等. 大喂入量水稻联合收获机脱粒清选装置的设计与试验[J]. 农机化研究,2018,40(8):70-74.
WEI Chuncai, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Design and experimental study of large feed quantity crawler full feeding rice combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018,40(8):70-74. (in Chinese)
- [5] 高志明,徐立章,李耀明,等. 履带式稻麦联合收获机田间收获工况下振动测试与分析[J]. 农业工程学报,2017,33(20):48-55.
GAO Zhipeng, XU Lizhang, LI Yaoming, et al. Vibration measure and analysis of crawler-type rice and wheat combine harvester in field harvesting condition[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(20):48-55. (in Chinese)
- [6] 福田禎彦. V コンバイン[J]. 農業機械學會誌,2009,71(1):22-25.

- [7] ALIZADEH M R, KHODABAKHSHIPOUR M. Effect of threshing drum speed and crop moisture on paddy grain damage in axial-flow thresher[J]. *Cercetari Agronomice in Moldova*, 2010, 4(144): 5-11.
- [8] MOHTASEBI S S, BEHROOZILAR M, ALIDADI J A. New design for grain combine thresher[J]. *Int. J. Agri. Biol.*, 2006, 8(5): 680-683.
- [9] 任述光, 谢方平, 王修善, 等. 4LZ-0.8型水稻联合收割机清选装置气固两相分离作业机理[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 16-22.
REN Shuguang, XIE Fangping, WANG Xiushan, et al. Gas-solid two-phase separation operation mechanism for 4LZ-0.8 rice combine harvester cleaning device[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(12): 16-22. (in Chinese)
- [10] 熊永森, 王金双, 陈德俊, 等. 小型全喂入双滚筒轴流联合收获机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(增刊): 35-38.
XIONG Yongsen, WANG Jinshuang, CHEN Dejun, et al. Design and experiment of small combine harvester with double axial cylinder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(Supp.): 35-38. (in Chinese)
- [11] 顾峰玮, 胡志超, 曹明珠, 等. 丘陵山区用轻筒型4LZ-1.0Q稻麦联合收获机的研制[J]. *中国农机化学报*, 2014, 35(2): 148-154.
GU Fengwei, HU Zhichao, CAO Mingzhu, et al. Design of 4LZ-1.0Q type lightweight-simplified combine harvester of rice wheat with hilly and mountainous area [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2014, 35(2): 148-154. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 市川友彦, 杉山隆夫. 汎用コンバインの開発研究(第1報)[J]. *農業機械學會誌*, 1996, 58(3): 77-86.
- [14] 王志明, 吕彭民, 陈霓, 等. 横置差速轴流脱分选系统设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(12): 53-61.
WANG Zhiming, LÜ Pengmin, CHEN Ni, et al. Design and experiment on axial-flow differential-speed threshing separating cleaning unit[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12): 53-61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161208&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.008. (in Chinese)
- [15] 陈霓, 余红娟, 陈德俊, 等. 半喂入联合收获机同轴差速脱粒滚筒设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(增刊): 39-42.
CHEN Ni, YU Hongjuan, CHEN Dejun, et al. Design and test on coaxial differential threshing rotor of head-feed combine harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(Supp.): 39-42. (in Chinese)
- [16] 王志明, 吕彭民, 陈霓, 等. 水稻籽粒连接力分布频谱分析及联合收获机差速脱粒装置研究[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2017, 43(1): 120-127.
WANG Zhiming, LÜ Pengmin, CHEN Ni, et al. Study on distribution spectrum of grain connection force and differential-speed threshing device for combine harvester[J]. *Journal of Zhejiang University(Agric. & Life Sci.)*, 2017, 43(1): 120-127. (in Chinese)
- [17] 刘正怀, 戴素江, 田立权, 等. 半喂入联合收获机回转式栅格凹板脱分装置设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(5): 169-178.
LIU Zhenghuai, DAI Sujiang, TIAN Liqian, et al. Design and experiment on rotary grate concave threshing-separating unit of head-feeding combine harvester[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5): 169-178. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180519&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.019. (in Chinese)
- [18] 刘正怀, 戴素江, 李明强, 等. 半喂入联合收获机活动栅格凹板装置设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2018, 39(5): 9-14.
LIU Zhenghuai, DAI Sujiang, LI Mingqiang, et al. Design and test of the head-feeding harvesters moving grate concave unit[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2018, 39(5): 9-14. (in Chinese)
- [19] 康栋, 吴崇友, 梁苏宁, 等. 谷子联合收获机脱粒装置设计与试验[J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22(2): 135-143.
KANG Dong, WU Chongyou, LIANG Suning, et al. Design and test of the threshing device of millet combine harvester[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(2): 135-143. (in Chinese)
- [20] 李耀明, 王建鹏, 徐立章, 等. 联合收获机脱粒滚筒凹板间隙调节装置设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(8): 68-75.
LI Yaoming, WANG Jianpeng, XU Lizhang, et al. Design and experiment on adjusting mechanism of concave clearance of combine harvester cylinder[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(8): 68-75. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180808&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.008. (in Chinese)
- [21] 王万中. 试验的设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [22] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.