

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.023

多参数可调可测式清选系统设计与试验

刘鹏¹ 金诚谦^{1,2} 杨腾祥² 陈满² 倪有亮² 印祥¹

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049; 2. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要: 为了改善国内谷物联合收获机风筛式清选装置清选作业参数的调控、监测与显示方式简单且自动化程度较低导致清选效率较低的问题。分析了谷物联合收获机风筛式清选装置4个清选作业参数(振动筛曲柄转速、风门开度、风机转速和鱼鳞筛筛片开度)的调节理论依据,对每个清选作业参数的调控与监测装置进行独立设计,在联合收获机风筛式清选装置基础上设计了多参数可调可测式清选系统,实现风筛式清选装置清选作业参数的自动化调控、监测与显示,整体系统采用电力驱动,实现了收获机风筛式清选装置的绿色环保作业。经准确性检测多参数可调可测式清选系统4个清选作业参数的调节精度均不小于97.17%,具有良好的鲁棒性,可实现4个清选作业参数的精确调控与实时显示。本文利用装配了多参数可调可测式清选系统的4LZ-4型全喂入履带收获机,以总损失率和含杂率为清选性能评价指标,进行了大豆机收田间试验,试验时样机运行良好。试验结果表明,大豆机收田间试验总损失率和含杂率平均值分别为3.13%和2.70%,达到行业标准要求。

关键词: 多参数可调可测式清选系统; 谷物联合收获机; 设计; 田间试验

中图分类号: S225.3; S225.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S2-0191-11

Design and Experiment of Multi Parameter Adjustable and Measurable Cleaning System

LIU Peng¹ JIN Chengqian^{1,2} YANG Tengxiang² CHEN Man² NI Youliang² YIN Xiang¹

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China

2. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: The regulation, monitoring and display mode of cleaning operation parameters of domestic grain combine harvester air and screen cleaning device is simple and low automation degree, resulting in low cleaning efficiency. Aiming to improve these problems, the theoretical basis of adjusting four cleaning operation parameters (the crank speed of vibrating screen, the opening of air door, the rotation speed of fan and the opening degree of fish scale screen) of the air and screen cleaning device of grain combine harvester were analyzed. The control and monitoring device of each cleaning operation parameter was designed independently. Based on the air and screen cleaning device of combine harvester, the multi parameter adjustable and measurable cleaning system was designed. The automatic control, monitoring and display of the cleaning operation parameters of the existing air and screen cleaning device, and the whole system was driven by electric power, realizing the green operation of the air and screen cleaning device of the harvester. Through the accuracy test, the adjustment accuracy of the four cleaning operation parameters of the multi parameter adjustable and measurable cleaning system was not less than 97.17%, which had good robustness, and can realize the accurate control and real-time display of the four cleaning operation parameters. The model 4LZ-4 full feeding crawler harvester equipped with multi parameter adjustable and measurable cleaning system was used in the field test of soybean harvester with total loss rate and impurity content as evaluation index of cleaning performance. The prototype ran well in the test.

收稿日期: 2020-08-03 修回日期: 2020-09-15

基金项目: 中国农业科学院基本科研业务费专项(S202007-3、S202015、CAAS-NRAM-SJ-201902)、现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-04-PS26)、山东省农机装备研发创新计划项目(2018YF006)、山东省高等学校优势学科人才团队培育计划项目(2016-2020)和山东省科技创新基地专项(SDKL2019014)

作者简介: 刘鹏(1989—),男,博士生,主要从事机械化旱作农业技术体系及装备研究,E-mail: 820016001@qq.com

通信作者: 金诚谦(1973—),男,研究员,博士生导师,主要从事大田作物收获机械化与智能化技术研究,E-mail: 412114402@qq.com

The results showed that the average loss rate and impurity content in the field experiment of soybean mechanical harvesting were 3.13% and 2.70%, respectively, which met the requirements of industry standard.

Key words: multi parameter adjustable and measurable cleaning system; grain combine harvester; design; field test

0 引言

风筛式清选装置是现阶段联合收获机完成谷物机收清选作业的主要设备,清选作业参数是风筛式清选装置运行时的可调节作业参数,清选作业参数的调控精度与自动化程度直接影响风筛式清选装置田间作业的清选效率与清选性能^[1-4]。

国内研究者在联合收获机清选装置作业参数的自动化调控与监测方面已开展了研究。熊思华等^[5]设计了稻麦联合收获机械总线化监控系统,实现清选风扇转速和尾筛开度等参数的实时监测与显示。张琨^[6]设计了玉米联合收获机脱粒清选监控系统,实现关键参数的监测与预警。蒋瑞锋^[7]设计了离心风扇模糊控制器,可根据收获机实际工况调控作业参数。李伟^[8]设计了基于无人机图像的智能稻麦联合收割机清选系统,运用无人机遥感影像获取目标区域作物的草谷比分布并通过增量式模糊控制模型实现联合收割机清选系统的参数调控。申昊^[9]设计的玉米收获机液压控制系统实现清选装置的液压驱动,利用 PLC 实现清选装置液压执行元件的实时监控与调节。蔡阳阳^[10]设计了联合收割机多功能一体化操控手柄控制装置,只凭操控手柄及按键就实现鱼鳞筛开度、前进速度和风机调风板等参数的调控。鲁业安等^[11]完成纵轴流风筛式清选装置试验台的电气控制系统设计,实现试验数据的实时采集与清选作业参数的实时调控。

现阶段我国在谷物联合收获机田间作业时风筛式清选装置清选作业参数的全面调控、监测与实时显示方面的研究还较少,清选作业参数多为人工调节、参数调节范围小且精度低,耗费作业时间和人力,导致清选效率与清选性能普遍较低,不符合联合收获机现代化发展要求^[12-15]。本文在联合收获机风筛式清选装置基础上设计多参数可调可测式清选系统,实现风筛式清选装置4个清选作业参数的显示终端调控、实时监测与显示,并通过大豆机收田间试验验证多参数可调可测式清选系统的清选性能。

1 整体结构与清选原理

1.1 整体结构

多参数可调可测式清选系统由显示终端与动力

模块、清选作业参数调控与监测模块组成。显示终端与动力模块用于实现作业速度的实时监测与显示、清选作业参数的设定与实时显示,并为多参数可调可测式清选系统的持续工作提供动力。清选作业参数调控与监测模块用于实现振动筛曲柄转速、风机转速、风门开度和鱼鳞筛筛片开度的参数调控与实时监测,清选作业参数均实现无级电动调控,确保收获机绿色环保作业,整体结构如图1所示。

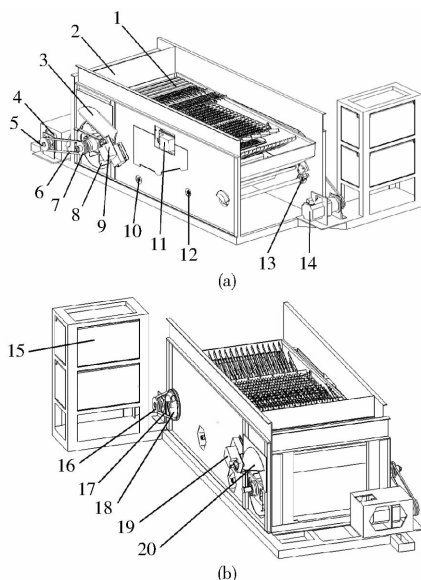


图1 多参数可调可测式清选系统整体结构

Fig.1 Overall structure of multi parameter adjustable and measurable cleaning system

1. 振动筛 2. 机架 3. 风门调节板 I 4. 风机电机 5. 风机主动轮 6. 风机皮带 7. 风机从动轮 8. 风机 9. 风门开度调节器 I 10. 集粮螺旋输送机 11. 筛片开度调节器 12. 复脱螺旋输送机 13. 曲柄连杆机构 14. 曲柄电机 15. 电源 16. 曲柄主动轮 17. 曲柄皮带 18. 曲柄从动轮 19. 风门开度调节器 II 20. 风门调节板 II

1.2 清选原理

风筛式清选装置根据脱粒混合物中籽粒与杂余的物料特性与空气动力学特性的差异完成清选作业,由风机、风道、机架、振动筛、集粮螺旋输送器和复脱螺旋输送机组成,结构如图2所示。风筛式清选装置工作时,振动筛不断进行往复运动,脱粒混合物持续由抖动板输送到鱼鳞筛,在风机经风道形成的气流场与振动筛往复运动的共同作用下,对脱粒混合物完成均匀分摊、疏松、分离和透筛,脱粒混合物中碎颖壳、细杂草和短茎秆等杂余被吹出机外,干

净的籽粒透过振动筛落入集粮螺旋输送机被输送到粮箱,少量未清选的脱粒混合物则透过尾筛落入复脱搅龙,进行二次脱粒清选^[16-23]。

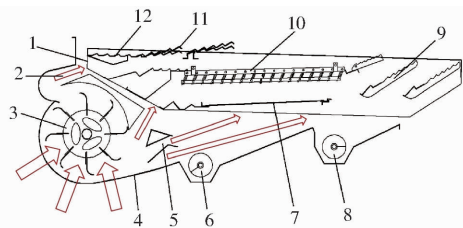


图 2 风筛式清选装置结构

Fig. 2 Structure of air screen cleaning device

- 1. 振动筛 2. 气流方向 3. 风机 4. 机架 5. 风道 6. 集粮螺旋输送机 7. 网筛 8. 复脱螺旋输送机 9. 尾筛 10. 鱼鳞筛 11. 指杆筛 12. 抖动板

2 总体设计

2.1 清选作业参数调控与监测模块设计

2.1.1 设计思路

由风筛式清选装置清选原理和图 2 可知,清选室气流场和振动筛的往复运动是风筛式清选装置实现脱粒混合物清选的主要作业因素。当振动筛和风道结构参数不可调时,风门开度和风机转速是形成清选室气流场的作业参数,振动筛曲柄转速是构建振动筛往复运动的作业参数,鱼鳞筛筛片开度是实现籽粒透筛和杂余清选的作业参数,因此这 4 个作业参数是风筛式清选装置的清选作业参数^[1-4]。实现风筛式清选装置清选作业参数的自动化调控、实时监测与显示之前,需要研究 4 个清选作业参数的调节范围和调节理论依据。

确定纵轴流联合收获机 4 个清选作业参数的调节范围,如表 1 所示^[16-29]。对风门开度、风机转速、振动筛曲柄转速与鱼鳞筛筛片开度的调节依据进行理论分析。按 4 个清选作业参数的调节范围和调节理论依据完成清选作业参数调控与监测模块设计,包括振动筛曲柄转速调控与监测装置、风门开度调控与监测装置、风机转速调控与监测装置和鱼鳞筛筛片开度调控与监测装置。

表 1 清选作业参数调节范围

Tab.1 Adjustment range of cleaning operation parameters

参数	数值
振动筛曲柄转速/($r \cdot \min^{-1}$)	50 ~ 600
风机转速/($r \cdot \min^{-1}$)	500 ~ 2 600
风门开度/($^{\circ}$)	0 ~ 18
鱼鳞筛筛片开度/mm	0 ~ 36

2.1.2 振动筛曲柄转速调控与监测装置设计

2.1.2.1 振动筛曲柄转速调节理论依据

由图 1、2 和文献[30]可知,因振动筛与曲柄

连杆机构中的固定轴承固接,清选系统作业时由曲柄连杆机构中连杆的转动带动铰链接的固定轴承和振动筛运动,凭借振动筛前端的滚动轴承和清选室内壁的轨道,约束振动筛作沿轨道方向的连续往复运动,故曲柄连杆机构是构成振动筛往复运动的实现机构。因连杆两端分别固定相同参数的曲柄,且曲柄与曲柄从动轮和偏心套固连,故振动筛曲柄转速的调节理论依据为:振动筛曲柄转速等于曲柄从动轮转速,实现曲柄从动轮转速调节就能实现曲柄转速调节。振动筛曲柄转速机构运动简化分析如图 3 所示, O 为机架与曲柄铰接点, OA 为曲柄连杆, A 为连杆与固定轴承铰接点, AB 为振动筛筛体, B 为振动筛与滚动轴承铰接点。

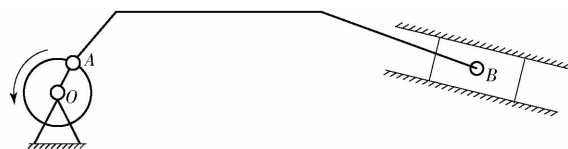


图 3 振动筛曲柄转速机构运动分析

Fig. 3 Kinematic analysis of crank speed of shale shaker

2.1.2.2 装置设计

振动筛曲柄转速调控与监测装置包括振动筛、滚动轴承、固定轴承、曲柄、连杆、偏心套、曲柄从动轮、曲柄皮带、曲柄主动轮和曲柄电机,结构如图 4 所示。振动筛曲柄转速调控与监测装置工作时,由显示终端与动力模块设定参数和提供电力,按控制系统的指令启动曲柄电机且通过输出轴带动曲柄主动轮开始转动并通过曲柄胶带带动曲柄从动轮转动,与曲柄从动轮固定的曲柄、连杆和偏心套同时转动,振动筛在曲柄连杆机构的带动下,依靠限制在振动筛前端左右两个滑道内的轴承,实现连续的往复运动。

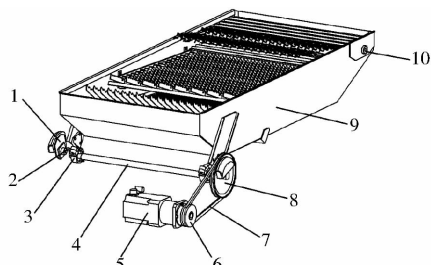


图 4 振动筛曲柄转速调控与监测装置结构

Fig. 4 Structure of crank speed of shale shaker control and monitoring device

- 1. 偏心套 2. 曲柄 3. 固定轴承 4. 连杆 5. 曲柄电机 6. 曲柄从动轮 7. 曲柄胶带 8. 曲柄主动轮 9. 振动筛 10. 滚动轴承

曲柄电机选用深圳市步科电气有限公司 SMC130D-0150-30AAK-4DKR 型的伺服电机,额定功率为 1 500 W,额定转速为 3 000 r/min,转速调

节范围为 0 ~ 3 000 r/min 且无级电动调节,具备实时监测功能。经测量,曲柄主动轮直径为 110 mm,曲柄从动轮直径为 220 mm,曲柄从动轮转速即为振动筛曲柄转速,计算式为

$$n_2 = \frac{n_1}{i} = \frac{n_1}{D_2/D_1} = \frac{n_1 D_1}{D_2} \quad (1)$$

式中 i ——主动轮与从动轮传动比

n_1 ——主动轮转速, r/min

n_2 ——从动轮转速, r/min

D_1 ——主动轮直径, mm

D_2 ——从动轮直径, mm

计算出振动筛曲柄转速的可调节范围为 0 ~ 1 500 r/min,满足表 1 中振动筛曲柄转速调节范围为 50 ~ 600 r/min 的需求。

2.1.3 风门开度与风机转速调控与监测装置设计

2.1.3.1 理论分析

由图 1、2、风筛式清选装置清选原理和文献[20]可知,收获机整体结构确定后,清选室气流场分布由风量、风速与风向决定。风道决定气流场的初始风向,而风道结构与振动筛结构相对应,振动筛结构不变,则风道数量、间隙与分风板角度等结构也不变。由上述分析得出,鱼鳞筛筛片开度、振动筛曲柄转速与作业速度不变时,风量、风速、风道内气流的均匀性与稳定性由风机转速与风门开度决定。设计风机转速与风门开度的调控与监测装置之前,先进行风机转速与风门开度调节依据的理论分析,两者的调节机构结构如图 5 所示,图中 θ 为风门开度, r 为圆形进风口半径, d 为弦心距。

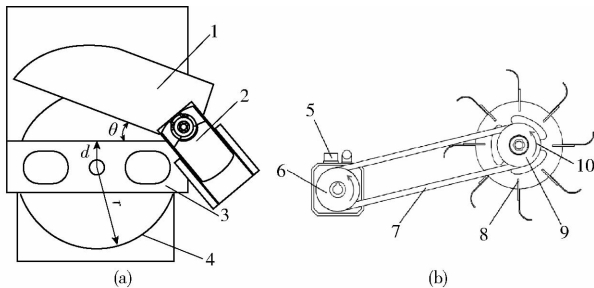


图 5 风门开度与风机转速的调控与监测装置结构图

Fig. 5 Structure of control and monitoring device for throttle opening and fan speed

1. 风门调节板 2. 风门开度调节器 3. 风机支架 4. 风机外壳
5. 风机电机 6. 风机主动轮 7. 风机胶带 8. 风机 9. 风机从动轮 10. 转动方向

(1) 风门开度调节理论依据

由图 1 和图 5a 可知,进风口近似圆形,进风口变化面积由风门调节板决定,进风口面积变化分析如图 6 所示。

进风口变化面积 S 、 θ_2 以及导函数 S' 计算式为

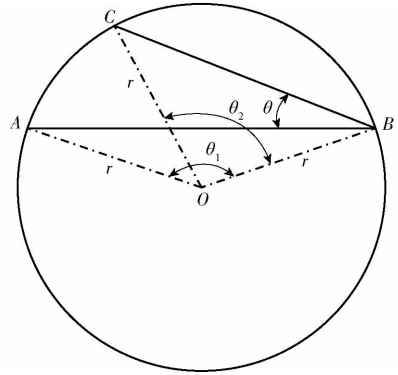


图 6 进风口面积变化分析

Fig. 6 Analysis of air inlet area change

$$S = S_1 - S_2 =$$

$$S_{11} - S_{12} - (S_{21} - S_{22}) =$$

$$\frac{\theta_1 \pi r^2}{360} - \frac{r^2 \sin \theta_1}{2} - \left(\frac{\theta_2 \pi r^2}{360} - \frac{r^2 \sin \theta_2}{2} \right) = \frac{r^2 \sin(\theta_1 - 2\theta)}{2} - \frac{\pi r^2 (\theta_1 - 2\theta)}{360} + \frac{\theta_1 \pi r^2}{360} - \frac{r^2 \sin \theta_1}{2} \quad (2)$$

$$\theta_2 = \theta_1 - 2\theta \quad (3)$$

$$S' = \left(\frac{r^2 \sin \theta_2}{2} - \frac{\pi r^2 \theta_2}{360} + \frac{\theta_1 \pi r^2}{360} - \frac{r^2 \sin \theta_1}{2} \right)' = \left(\frac{r^2 \sin \theta_2}{2} \right)' - \left(\frac{\pi r^2 \theta_2}{360} \right)' = \frac{r^2}{2} \left(-2 \cos \theta_2 + \frac{\pi}{90} \right) \quad (4)$$

式中 S ——进风口变化面积, mm²

S_1 ——劣弧 AB 面积, mm²

S_2 ——劣弧 CB 面积, mm²

S_{11} ——扇形 AOB 面积, mm²

S_{12} —— $\triangle AOB$ 面积, mm²

S_{21} ——扇形 COB 面积, mm²

S_{22} —— $\triangle COB$ 面积, mm²

θ_1 —— $\angle AOB$ 角度, 为常数 140°

θ_2 —— $\angle COB$ 角度, (°)

经实际测量和表 1 可知,进风口半径 r 为 200 mm、 θ_1 为 140°、风门开度调节范围为 $0^\circ \leq \theta \leq 18^\circ$ 。圆周角 $\angle ABC$ 与圆心角 $\angle AOC$ 对应同一条劣弧 AB 且 $\angle ABC$ 为 θ , 则 $\angle AOC$ 为 2θ , 即 $0^\circ \leq 2\theta \leq 36^\circ$ 。由图 6 可知, C 为风门调节板与圆形进风口的交叉点, 点 C 与点 A 重合时, 风门调节板处于初始位置, 当风门调节板 BC 绕铰接点 B 沿劣弧 AB 顺时针方向调节时, 2θ 逐渐变大且 θ_2 随之变小, 当风门调节板 BC 绕铰接点 B 沿劣弧 AB 逆时针方向调节时, 2θ 逐渐变小且 θ_2 随之变大, 求出 θ_2 的调节范围为 $104^\circ \leq \theta_2 \leq 140^\circ$ 。按余弦定理, 当 θ_2 取值区间为 $[104^\circ, 140^\circ]$ 时, $-2\cos \theta_2$ 单调递减, 将区间 $[104^\circ, 140^\circ]$ 的端点 104° 和 140° 分别代入式 (4) 计算, 结果均大于 0, 得

出当 θ_2 取值区间为 $[104^\circ, 140^\circ]$ 时导函数 $S' > 0$, 根据式(3)和导函数大于 0 则原函数单调递增, 得出进风口变化面积 S 与风门开度 θ 的关系为: S 由 θ 决定, 在 θ 取值区间 $[0^\circ, 18^\circ]$ 上, S 单调递增。得出风门开度调节理论依据为: 使风门调节板 BC 绕铰接点 B 实现 $\angle ABC$ 角度 $\theta 0^\circ \sim 18^\circ$ 往复调节, 即可实现风门开度 $\theta 0^\circ \sim 18^\circ$ 往复调节。

(2) 风门转速调节理论依据

由图 1、2、风筛式清选装置清选原理和图 5b 可知, 风机及其转动是形成气流场的必要条件和影响风速的决定参数。采用叶轮、叶片与连接轴一体式风机, 连接轴与风机从动轮固连, 故风门转速调节理论依据为: 风机从动轮转速等于风机转速, 实现风机从动轮转速调节即可实现风机转速调节。

2.1.3.2 装置设计

(1) 风门开度调控与监测装置包括风门调节板、风门开度调节器、风机支架和风机外壳, 两个风门开度的调节参数相同。风门开度调控与监测装置工作时, 由显示终端与动力模块设定参数和提供电力, 两个风门开度调节器按控制系统的指令通过转动轴同时带动两个风门调节板按相同转速转动相同角度 θ , 确保两个进风口的进风量相同, 以此实现风门开度调节, 即完成风机进风口面积调节。并将风门开度的调节信息传递到主控制器由显示终端实时显示。风门开度调节器采用北京易觅尔科技有限公司的 Y40M24-MF 型电动风阀执行器, 当显示终端向电动风阀执行器发送一个控制信号时, 转动轴就转到特定位置。控制信号持续不变, 电动风阀执行器则保持转动轴的角度位置不变, 满足风门开度调控与监测装置的自锁需求。该电动风阀执行器通过调节电流来调节风门开度, 电流调节范围是 4 ~ 20 mA, 对应风门开度调节范围是 $0^\circ \sim 90^\circ$, 满足表 1 中风门开度调节范围 $0^\circ \sim 18^\circ$ 的需求。

(2) 风机转速调控与监测装置包括风机电机、风机主动轮、风机胶带、风机和风机从动轮, 风机转速调控与监测装置工作时, 由显示终端与动力模块设定参数和提供电力, 风机电机启动且通过输出轴带动风机主动轮开始转动, 然后经风机胶带带动风机从动轮转动, 与风机从动轮固连的风机同时转动, 以此实现风机运作。由此通过调节风机电机的转速来实现风机转速调节, 风机电机采用振动筛曲柄转速调控与监测装置相同型号的伺服电机。实际测得风机主动轮与风机从动轮的直径均为 110 mm, 结合伺服电机转速调节范围为 0 ~ 3 000 r/min, 用式(1)计算风机转速调节范围为 0 ~ 3 000 r/min, 满足表 1 中风机转速调节范围为 500 ~ 2 600 r/min 的需求。

2.1.4 鱼鳞筛筛片开度调控与监测装置设计

2.1.4.1 鱼鳞筛筛片开度调节理论依据

由图 1、2、风筛式清选装置清选原理和文献[31]可知, 在收获机结构固定, 且风机转速、风门开度、振动筛曲柄转速与作业速度不变的前提下, 鱼鳞筛筛片开度是影响振动筛表面脱粒混合物透筛和清选性能的决定参数。在设计鱼鳞筛筛片开度调控与监测装置之前, 先分析脱粒混合物处于鱼鳞筛筛片间隙和筛片表面的受力情况, 如图 7a 所示, 然后分析筛片开度与角度变化的对应关系, 如图 7b 所示, 综合两者的相关性分析鱼鳞筛对脱粒混合物的风选筛分原理, 进而推理出鱼鳞筛筛片开度的调节理论依据。

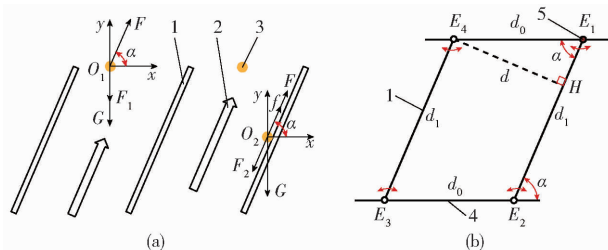


图 7 脱粒混合物处于鱼鳞筛筛片间隙与表面的受力分析以及鱼鳞筛筛片开度的变化分析

Fig. 7 Stress analysis of threshing mixture in gap and surface of fish scale screen and change of opening of fish scale screen
1. 鱼鳞筛筛片 2. 气流 3. 脱粒混合物 4. 连接板 5. 铰链接

由图 7a 可知, O_1 和 O_2 用于表示脱粒混合物颗粒, 包含籽粒和杂余, 以下简称颗粒。颗粒 O_1 位于筛片间隙内, 此时颗粒处于悬浮状态, 只受到自身重力 G 和气流场风力 F 的作用。颗粒 O_2 位于筛片表面, 受到自身重力 G 、气流场风力 F 和筛片表面摩擦力 f 的作用。从图 7 和实际测量可知, 鱼鳞筛相邻筛片间上下两个连接板的长度均为 d_0 , 故鱼鳞筛相邻筛片均为互相平行, 且气流通过鱼鳞筛时方向会受到鱼鳞筛筛片的约束, 气流方向与筛片表面方向平行, 此时风力 F 方向平行于筛片表面的斜向上方向, 风力 F 方向角等于筛片变化角 α 。由风筛式清选装置清选原理可知, 籽粒透筛时是从筛片间隙掉落和沿筛片表面斜向下运动, 而杂余被吹出机外, 故分别设定竖直向下和沿筛片表面斜向下方向为正方向, 此时 F_1 和 F_2 均大于 0, 反方向则为负方向, 此时 F_1 和 F_2 均小于 0。当籽粒受到的 F_1 和 F_2 均大于零, 杂余受到的 F_1 和 F_2 均小于 0 时, 才能满足风筛式清选装置的作业条件。结合图 7、式(5)、(6)可得, 风筛式清选装置其余作业参数不变时, 筛片变化角 α 决定了筛片间隙内气流场风力的方向、脱粒混合物颗粒处于筛片间隙与筛片表面时的加速度, 即决定了籽粒的透筛速度、杂余的吹出方向与速度以及距离。脱粒混合物颗粒分别在筛片间隙和筛片表面时

所受的合力与加速度为

$$\begin{cases} F_1 = G - F_y \\ a_1 = \frac{F_1}{m} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $G = mg$ $F_y = F \sin \alpha$ $F = kmv^2$ $k = \frac{\rho \mu_1 S_3}{m}$

$$\begin{cases} F_2 = G_1 - (F + f) \\ a_2 = \frac{F_2}{m} \end{cases} \quad (6)$$

其中 $G_1 = G \sin \alpha$ $f = G_2 \mu_2$ $G_2 = G \cos \alpha$
 式中 F_1 ——颗粒处于筛片间隙时所受合力,N
 F_y ——颗粒所受风力在 y 轴方向分力,N
 m ——颗粒质量,kg
 g ——重力加速度, m/s^2
 k ——漂浮系数, mm^{-1}
 v ——气流速度, m/s
 ρ ——空气密度, kg/m^3
 μ_1 ——空气阻力系数
 S_3 ——颗粒垂直于气流平面的投影面积, m^2
 a_1 ——颗粒处于筛片间隙时加速度, m/s^2
 F_2 ——颗粒处于筛片表面时所受合力,N
 G_1 ——颗粒处于筛片表面时所受重力平行于筛片表面方向的分力,N
 f ——颗粒处于筛片表面时所受摩擦力,N
 G_2 ——颗粒处于筛片表面时所受重力垂直于筛片表面方向的分力,N
 μ_2 ——颗粒与筛片表面摩擦因数
 a_2 ——颗粒处于筛片表面时加速度, m/s^2

由图 7b 可知,鱼鳞筛筛片变化角改变时,会引起相邻筛片垂直间距变化,导致筛片间隙横截面积随之变化,单位时间内筛片间隙的通风量、脱粒混合物透筛量与杂余吹出量也随之变化。筛片变化角度对应的鱼鳞筛相邻筛片垂直间距和单位时间内通过相邻筛片间隙横截面的风量为

$$L = 3\ 600 S_4 v \quad (7)$$

其中 $S_4 = dd_1$ $d = d_0 \sin \alpha$ $\alpha = \arcsin \frac{d}{d_0}$

式中 L ——单位时间内通过相邻筛片间隙横截面积的风量, m^3/s

S_4 ——相邻筛片间隙横截面积, m^2
 d ——鱼鳞筛相邻筛片垂直间距,mm
 d_1 ——筛片宽度,mm
 d_0 ——相邻筛片间连接板长度,mm

因 d_0 、 d_1 与 v 为实际测量的定值, α 决定 d , d 决定 S_4 , S_4 决定 L ,故筛片变化角 α 是决定单位时间内相邻筛片间隙横截面通风量 L 的初始自变量。但鱼

鳞筛相邻筛片垂直间距 d 直接反映相邻筛片间隙横截面积 S_4 和单位时间内相邻筛片间隙横截面通风量 L ,为了便于实际测量和直观表达,将鱼鳞筛相邻筛片垂直间距 d 作为鱼鳞筛筛片开度。

按照上述理论分析得出,鱼鳞筛筛片开度 d 可由筛片变化角 α 直接决定,只需实现筛片变化角 α 调控即可完成鱼鳞筛筛片开度 d 的调控。由图 7b 可知, E_1 、 E_2 、 E_3 和 E_4 均为筛片与连接板的铰链接,将鱼鳞筛筛片顺时针旋转,调节至闭合状态,此时 α 为 0° 且 d 也为 $0\ mm$,将此时的 α 和 d 作为初始值,以铰链接 E_1 为转动点且连接板 E_1E_4 与振动筛固定,使筛片 E_1E_2 绕铰链接 E_1 做逆时针转动,则筛片 E_1E_2 和筛片 E_3E_4 同时调节相同角度,可实现筛片变化角 α 和鱼鳞筛筛片开度 d 的参数变大调节。由 $d = d_0 \sin \alpha$ 可知,当 $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 时, $0 \leq \sin \alpha \leq 1$,故 $\alpha = 90^\circ$ 时 $\sin \alpha = 1$,此时鱼鳞筛筛片开度 d 为最大值且等于 d_0 。然后使筛片 E_1E_2 绕铰链接 E_1 做顺时针转动,可实现筛片变化角 α 和鱼鳞筛筛片开度 d 的参数变小调节。由鱼鳞筛的全部筛片均两两平行且相邻筛片间距相同,得出鱼鳞筛各筛片均实现相同角度的同时调节,故鱼鳞筛筛片开度调节理论依据为:在铰链接 E_1 处实现筛片 E_1E_2 的筛片变化角 α 调节即可实现鱼鳞筛筛片开度 d 的调节。按理论分析对鱼鳞筛筛片开度进行自动化调控与监测设计。

2.1.4.2 装置设计

由图 8 可知,鱼鳞筛筛片开度调控与监测装置包括鱼鳞筛筛片、筛片开度调节片、筛片开度调节器和连接板,筛片开度调节器的转动轴与筛片开度调节片的连接轴固连。筛片开度调节器采用与风门开度调节器相同型号的电动风阀执行器。按电动风阀执行器中电流与转动角度的对应关系完成主控制器的编程。鱼鳞筛筛片开度调控与监测装置工作时,由显示终端与动力模块设定鱼鳞筛筛片开度 d 和提供电力,筛片开度调节器按控制系统的指令将鱼鳞筛筛片开度 d 转为筛片变化角 α ,并将信息传递到

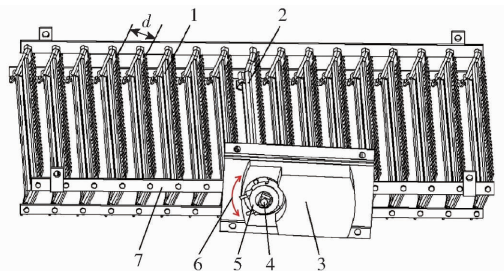


图 8 鱼鳞筛筛片开度调控与监测装置结构

Fig. 8 Structure of opening of chaffer control and monitoring device

1. 鱼鳞筛筛片
2. 筛片开度调节片
3. 筛片开度调节器
4. 连接轴
5. 转动轴
6. 转动轴转动方向
7. 筛片连接板

筛片开度调节器,筛片开度调节器控制转动轴通过连接轴带动筛片开度调节片转动角 α ,之后自锁,完成鱼鳞筛筛片开度 d 的调节。然后将实时监测的筛片变化角 α ,传递到主控制器进行处理,转为鱼鳞筛筛片开度 d ,由显示终端实时显示。实际测量出鱼鳞筛相邻筛片间连接板长度 d_0 为 43 mm,故选用鱼鳞筛筛片开度 d 调节范围是 0 ~ 43 mm,满足表 1 中鱼鳞筛筛片开度调节范围为 0 ~ 36 mm 的需求。

2.2 显示终端与动力模块设计

2.2.1 模块组成

显示终端与动力模块由主控制器、组态屏、GPS 接收器、电压转换器、电源、2 个伺服电机控制器和 3 个电动风阀执行器等组成,如图 9 所示。GPS 接收器为深圳北天通信生产的 BD-8953 GNSS 型接收器。主控制器芯片为 M8030-KT,定位精度为 2 m,速度精度为 0.1 m/s,时间精度为 1 μ s,控制器输入电平为 RS232,数据输出频率为 5 Hz。组态屏是威纶通科技生产的 MT6103IP 组态屏,分辨率为 1 024 \times 600,支持两路 RS232 与两路 RS485,供电电压为 12 V,内存为 128 MB,处理器为 32 Bits RISC Cortex-A8 600 MHz。主控制器的处理器为 STM32F103ZET6,主频 72 MHz,主控制器有两路 RS232,两路 RS485,一路 CAN 总线,4 路模拟量输入与 4 路模拟量输出。显示终端与动力模块的电源由 4 个相同型号的蓄电池组成,采用超威品牌的电动道路车辆用铅酸蓄电池,型号为 6-EVF-150A,单个蓄电池容量为 150 A·h,经检测在实际田间清选作业中电源电量的使用时间约为 2.5 h。

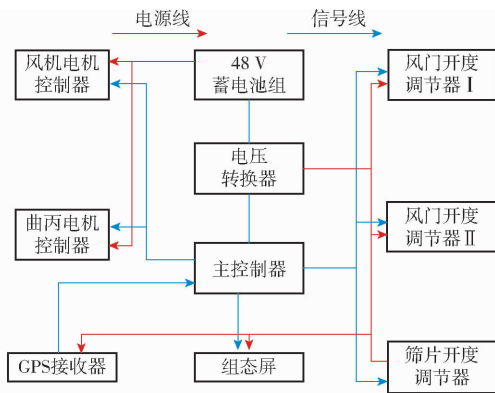


图 9 显示终端与动力模块的组成与逻辑关系

Fig.9 Composition and logical relationship between display terminal and power module

2.2.2 工作原理

显示终端与动力模块工作时,由蓄电池提供电力,从组态屏中人工设置振动筛曲柄转速、风门开度、风机转速与鱼鳞筛筛片开度的参数,通过主控制器控制清选作业参数调控与监测模块完成 4 个清选作业参数的自动化调控和实时监测,实时监测到的

清选作业参数反馈到主控制器在组态屏上实时显示。收获机开始作业后,GPS 接收器开始接收位置信息,并传递到主控制器处理后在组态屏上实时显示收获机作业速度,驾驶员根据实时显示数据,通过调控作业速度实现喂入量调控,确保清选装置的清选效率和清选性能。显示终端如图 10 所示。



图 10 组态屏显示终端

Fig.10 Configuration screen display terminal

3 大豆机收田间试验

3.1 准确性检测

在田间试验之前,对多参数可调可测式清选系统 4 个清选作业参数调控与监测装置的准确性进行检测与分析。准确性检测方法是在空载状态下,通过组态屏调控 4 个清选作业参数完成 3 个水平调节,每个水平重复调节 10 次,每次均由人工测量且求出平均值。人工测量 4 个清选作业参数时,采用非接触式转速表测量振动筛曲柄转速和风机转速,采用角度测量数显水平仪测量风门开度,采用电子数显游标卡尺测量鱼鳞筛筛片开度,将人工测量的 4 个清选作业参数平均值与组态屏设定的参数进行差的绝对值计算,此绝对值即为误差,由误差求出控制精度。准确性检测数据如表 2 所示。

表 2 准确性检测数据

Tab.2 Accuracy test data

参数	水平	人工测量 平均值	误差	调节精 度/%	精度平均 值/%
风机转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	1 300	1 337	37	97.15	97.21
	1 400	1 362	38	97.29	
	1 500	1 458	42	97.20	
风门开度/ $(^\circ)$	0	0	0	100	98.94
	9	8.86	0.14	98.44	
	18	17.71	0.29	98.39	
振动筛曲柄转 速/ $(r \cdot \min^{-1})$	350	340	10	97.14	97.17
	400	389	11	97.25	
	450	463	13	97.11	
鱼鳞筛筛片开 度/mm	23	22.57	0.43	98.13	97.92
	28	27.45	0.55	98.04	
	33	32.20	0.80	97.58	

由表2可知,4个清选作业参数的调节精度均不小于97.17%,得出多参数可调可测式清选系统具有良好的鲁棒性,能够实现4个清选作业参数的精确调控与实时显示。

3.2 大豆特性参数与机具参数

田间试验前,在试验区域按大豆机收割茬高度采集 1 m^2 大豆植株样本和 1 m^2 自然落粒样本,分析本次试验用“笨大豆”大豆品种的特性参数,如表3所示。

表3 大豆特性参数

Tab.3 Characteristic parameters of soybean

参数	数值
大豆植株量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	684
自然落粒量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	2
大豆收获量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	285
产量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	285
大豆秸秆量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	399
大豆草谷比	1.4
籽粒含水率/%	15.1
百粒质量/g	38.2
底荚高度/mm	152
植株高度/mm	635
蓬面直径/mm	212
豆荚长度/mm	58.2

实际测量试验用收获机结构参数,如表4所示。大豆机收田间的联合收获机作业参数,如表5所示^[16-18]。

表4 收获机结构参数

Tab.4 Structural parameters of harvester

参数	数值
额定功率/kW	72.9
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	5 620×2 810×2 990
滚筒长度/mm	2210
滚筒直径/mm	620
脱粒滚筒形式	单纵钉齿轴流式
上筛尺寸(长×宽)/(mm×mm)	740×760
下筛尺寸(长×宽)/(mm×mm)	580×780
鱼鳞筛筛片尺寸(长×宽)/(mm×mm)	740×70
网筛孔尺寸(长×宽)/(mm×mm)	14×14
风机叶轮直径/mm	380
风机叶片数量/个	8
割台实际割幅/m	2
曲柄半径/mm	30

3.3 试验过程

试验时间为2019年10月19日—22日,试验地点在山东省临沂市河东区大豆试验基地。试验时在清选室排出口用清选损失接料袋收集清选损失样本,在粮箱入粮口处由试验人员用小网袋收集含杂

表5 收获机作业参数

Tab.5 Operating parameters of harvester

参数	数值
割茬高度/mm	80
喂入螺旋输送机转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	185
输送链耙转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	440
脱粒滚筒转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	600
拨禾轮转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	44
作业速度/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	4
鱼鳞筛筛片开度/mm	28
风门开度/(°)	9
风机转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	1 400
振动筛曲柄转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	400

样本。每组试验后,用 1 m^2 正方框在收获机后方收集 1 m^2 剩余损失样本。试验过程如图11所示。根据国家标准 GB/T 8097—2008《收获机械联合收获机试验方法》和行业标准 JB/T 11912—2014《大豆收割机》确定大豆机收田间试验作业长度为25 m和试验数据计算方法。



图11 大豆机收田间试验过程

Fig.11 Field experiment process of soybean mechanical harvest

3.4 试验数据计算方法

由风筛式清选装置清选原理可知,大豆机收时风筛式清选装置对收获机作业性能造成直接影响的评价指标为总损失率和含杂率,清选系统对大豆籽粒的破碎作用可忽略,故排除破碎率,只将总损失率和含杂率作为多参数可调可测式清选系统田间作业时清选性能的评价指标^[17-18]。参照行业标准 JB/T 11912—2014《大豆收割机》,喂入量、总损失率和含杂率计算式为

$$Q = \frac{W}{t} = \frac{m'Bl}{t} = m'Bv \quad (8)$$

$$P_s = \frac{W_{ss}}{W_{ss} + W_{sh}} \times 100\% \quad (9)$$

$$P_z = \frac{W_{zz} - W_{zq}}{W_{zz}} \times 100\% \quad (10)$$

其中

$$W_{ss} = W_{sq} + W_{sy} - W_{sz}$$

式中 Q ——喂入量, kg/s

W ——每组试验喂入大豆植株质量, kg

t ——每组试验作业时间, s

m' ——大豆植株质量, g

B ——割幅, m l ——作业距离, m
 v ——作业速度, m/s P_s ——总损失率, %
 W_{ss} ——大豆损失量, g/m²
 W_{sh} ——大豆收获量, g/m²
 P_z ——含杂率, %
 W_{zz} ——含杂样本质量, g
 W_{zq} ——杂质清除后样本质量, g
 W_{sq} ——清选损失量, g/m²
 W_{sy} ——剩余损失量, g/m²
 W_{sz} ——自然落粒量, g/m²

3.5 数据统计与分析

由式(8)计算出大豆机收田间试验的喂入量为 1.52 kg/s, 大豆机收田间试验总损失率与含杂率如表 6 所示。

表 6 大豆机收田间试验数据

Tab. 6 Field test data of soybean mechanical harvest

试验序号	总损失率 P_s	含杂率 P_z
1	3.71	4.69
2	2.49	4.09
3	3.62	3.80
4	3.15	1.90
5	2.81	1.10
6	2.97	0.60
平均值	3.13	2.70

由表 6 可知, 大豆机收田间试验总损失率和含杂率平均值分别为 3.13% 和 2.70%, 均符合行业标准 JB/T 11912—2014《大豆收割机》中大豆机收总损失率不大于 5% 和含杂率不大于 3% 的要求。

4 结论

(1) 设计了一款多参数可调可测式清选系统, 分析了风筛式清选装置清选作业参数中振动筛曲柄转速、风门开度、风机转速和鱼鳞筛筛片开度的调节理论依据, 实现这 4 个清选作业参数的显示终端调控、实时监测与显示以及作业速度的实时监测与显示, 清选作业参数均实现无级电动调控, 整体系统全部采用电力驱动, 确保联合收获机风筛式清选装置的田间自动化绿色环保作业。经准确性检测, 4 个清选作业参数调控与监测装置的调节精度均不小于 97.17%, 具有良好的鲁棒性, 可实现 4 个清选作业参数的精确调控与实时显示。

(2) 利用装配多参数可调可测式清选系统的 4LZ-4 型全喂入履带收获机, 以总损失率和含杂率为清选性能评价指标, 进行了大豆机收田间试验, 试验时样机运行良好。试验结果表明, 大豆机收田间试验的总损失率和含杂率平均值分别为 3.13% 和 2.70%, 符合行业标准 JB/T 11912—2014《大豆收割机》中大豆机收评价指标的要求。

参 考 文 献

- [1] 刘鹏, 金诚谦, 印祥, 等. 大豆联合收获机清选装置与关键技术研究进展[J]. 浙江农业学报, 2019, 31(10): 1758-1766. LIU Peng, JIN Chengqian, YIN Xiang, et al. Research progress on cleaning device and key technology of soybean combine harvester [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2019, 31(10): 1758-1766. (in Chinese)
- [2] 徐立章, 李洋, 李耀明, 等. 谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 1-16. XU Lizhang, LI Yang, LI Yaoming, et al. Research progress on cleaning technology and equipment of grain combine harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191001&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.001. (in Chinese)
- [3] 宁新杰, 金诚谦, 印祥, 等. 谷物联合收割机风筛式清选装置研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(9): 5-10. NING Xinjie, JIN Chengqian, YIN Xiang, et al. Research status and development trend of air screen cleaning device for grain combine harvester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(9): 5-10. (in Chinese)
- [4] 李骅. 风筛式清选装置设计理论与方法研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012. LI Hua. Research on design theory and method of air and screen cleaning device [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [5] 熊思华, 李彦明, 焦中元, 等. 稻麦联合收获机械总线化监控系统研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(4): 190-193, 199. XIONG Sihua, LI Yanming, JIAO Zhongyuan, et al. Research on the bus monitoring system of rice wheat combine harvester [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(4): 190-193, 199. (in Chinese)
- [6] 张琨. 玉米联合收获机脱粒清选监控系统研究[D]. 济南: 济南大学, 2017. ZHANG Kun. Research on threshing and cleaning monitoring system of corn combine harvester [D]. Ji'nan: Jinan University, 2017. (in Chinese)
- [7] 蒋瑞锋. 电驱动联合收割机智能控制系统的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015. JIANG Ruifeng. Research on intelligent control system of electric driven combine harvester [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [8] 李伟. 基于无人机图像的智能稻麦联合收割机清选系统研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019. LI Wei. Research on cleaning system of intelligent rice wheat combine based on UAV image [D]. Hefei: University of Science

and Technology of China, 2019. (in Chinese)

- [9] 申昊. 玉米联合收获机整机液压控制系统研发[D]. 济南: 济南大学, 2019.
SHEN Hao. Research and development of hydraulic control system for corn combine harvester [D]. Ji'nan: Jinan University, 2019. (in Chinese)
- [10] 蔡阳阳. 联合收割机多功能一体化操控手柄控制装置的研制[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
CAI Yangyang. Development of multifunctional integrated control handle control device for combine harvester [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
- [11] 鲁业安, 马玲, 张义峰. 清选装置电气控制系统设计[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(32): 15979 - 15981.
LU Yean, MA Ling, ZHANG Yifeng. Design of electrical control system of cleaning device [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(32): 15979 - 15981. (in Chinese)
- [12] 苏天生, 韩增德, 崔俊伟, 等. 谷物联合收割机清选装置研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究, 2016, 38(2): 6 - 11.
SU Tiansheng, HAN Zengde, CUI Junwei, et al. Research status and development trend of grain combine cleaning device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(2): 6 - 11. (in Chinese)
- [13] 汤庆, 吴崇友, 王素珍, 等. 谷物清选装置研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究, 2013, 35(12): 225 - 228.
TANG Qing, WU Chongyou, WANG Suzhen, et al. Research status and development trend of grain cleaning device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(12): 225 - 228. (in Chinese)
- [14] 刘大为, 卢伟, 王修善, 等. 联合收割机旋风分离清选装置研究现状及发展趋势[J]. 农业装备与车辆工程, 2016, 54(5): 8 - 13.
LIU Dawei, LU Wei, WANG Xiushan, et al. Research status and development trend of cyclone separation and cleaning device of combine harvester [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2016, 54(5): 8 - 13. (in Chinese)
- [15] 王国强, 李永, 王伟, 等. 联合收割机智能化研究现状与发展探索[J]. 南方农机, 2019, 50(17): 25.
WANG Guoqiang, LI Yong, WANG Wei, et al. Research status and development exploration of intelligent combine harvester [J]. China Southern Agricultural Machinery, 2019, 50(17): 25. (in Chinese)
- [16] 金诚谦, 郭飞扬, 徐金山, 等. 大豆联合收获机作业参数优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 10 - 22.
JIN Chengqian, GUO Feiyang, XU Jinshan, et al. Optimization of operation parameters of soybean combine harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(13): 10 - 22. (in Chinese)
- [17] 刘鹏, 金诚谦, 刘政, 等. 大豆联合收获机田间清选作业参数优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 35 - 45.
LIU Peng, JIN Chengqian, LIU Zheng, et al. Optimization of field cleaning operation parameters of soybean combine harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 35 - 45. (in Chinese)
- [18] 刘鹏, 金诚谦, 宁新杰, 等. 大豆机收清选筛田间性能试验与分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 36 - 43.
LIU Peng, JIN Chengqian, NING Xinjie, et al. Field performance test and analysis of soybean harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 36 - 43. (in Chinese)
- [19] 梁振伟, 李耀明, 马培培, 等. 纵轴流联合收获机清选装置结构优化与试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(5): 170 - 174.
LIANG Zhenwei, LI Yaoming, MA Peipei, et al. Structural optimization and test of cleaning device for longitudinal axial flow combine harvester [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(5): 170 - 174. (in Chinese)
- [20] 樊晨龙, 崔涛, 张东兴, 等. 纵轴流联合收获机双层异向清选装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 239 - 248.
FAN Chenlong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of double layer opposite direction cleaning device for longitudinal axial flow combine harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49 (Supp.): 239 - 248. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s032&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.032. (in Chinese)
- [21] 唐伦. 油菜联合收获机清选装置的优化分析及试验研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2010.
TANG Lun. Optimization analysis and experimental study on cleaning device of rape combine harvester [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- [22] 张敏, 金诚谦, 梁苏宁, 等. 风筛选式油菜联合收割机清选机构参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 8 - 15.
ZHANG Min, JIN Chengqian, LIANG Suning, et al. Parameter optimization and test of cleaning mechanism of wind screening rape combine [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(24): 8 - 15. (in Chinese)
- [23] 余波. 基于 EDEM 的小区收割机振动筛筛分性能研究与优化[D]. 成都: 西华大学, 2016.
YU Bo. Research and optimization of screening performance of community harvester vibrating screen based on EDEM [D]. Chengdu: Xihua University, 2016. (in Chinese)
- [24] 程超, 付君, 陈志, 等. 玉米籽粒收获机清选装置参数优化试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 151 - 158.
CHENG Chao, FU Jun, CHEN Zhi, et al. Parameter optimization test of corn grain harvester cleaning device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 151 - 158. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190715&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.015. (in Chinese)
- [25] 程超, 付君, 陈志, 等. 收获机振动筛振动参数影响不同湿度脱出物粘附特性[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 29 - 36.
CHENG Chao, FU Jun, CHEN Zhi, et al. Influence of vibration parameters of harvester vibrating screen on adhesion characteristics of different moisture contents [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 29 - 36. (in Chinese)
- [26] 童水光, 沈强, 唐宁, 等. 纵轴流清选装置混合流场数值模拟与优化试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 135 - 142.

- TONG Shuiguang, SHEN Qiang, TANG Ning, et al. Numerical simulation and optimization test of mixed flow field in axial flow cleaning device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 135 - 142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160719&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 07. 019. (in Chinese)
- [27] 李树兵. 风筛式清选装置试验分析与预测研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2014.
LI Shubing. Experimental analysis and prediction research on air and screen cleaning device [D]. Zibo: Shandong University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [28] 陈立. 油菜联合收获机清选装置的设计与试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
CHEN Li. Design and experimental study on cleaning device of rape combine harvester [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [29] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [30] 于昭洋, 胡志超, 曹明珠, 等. 切流式花生全喂入联合收获机清选机构设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 29 - 37.
YU Zhaoyang, HU Zhichao, CAO Mingzhu, et al. Design of cleaning mechanism of cutting flow type peanut full feed combine harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 29 - 37. (in Chinese)
- [31] 王立军, 冯鑫, 武振超, 等. 玉米联合收获机贯流风阶梯式振动筛设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 115 - 123.
WANG Lijun, FENG Xin, WU Zhenchao, et al. Design and test of cross flow stepped vibrating screen for corn combine harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 115 - 123. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181013&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 10. 013. (in Chinese)

(上接第 138 页)

- [16] 姚艳春, 宋正河, 杜岳峰, 等. 玉米收获机割台振动特性及其主要影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 40 - 49.
YAO Yanchun, SONG Zhenghe, DU Yuefeng, et al. Analysis of vibration characteristics and its major influenced factors of header for corn combine harvesting machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 40 - 49. (in Chinese)
- [17] 李耀明, 李有为, 徐立章, 等. 联合收获机割台机架结构参数优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 30 - 37.
LI Yaoming, LI Youwei, XU Lizhang, et al. Structural parameter optimization of combine harvester header frame [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 30 - 37. (in Chinese)
- [18] 高志朋, 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)
- [19] 蒋亚军, 廖宜涛, 秦川, 等. 4SY-2.9 型油菜割晒机机架振动分析及改进[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 53 - 60.
JIANG Yajun, LIAO Yitao, QIN Chuan, et al. Vibration analysis and improvement for frame of 4SY - 2.9 typed rape windrower[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 53 - 60. (in Chinese)
- [20] 马丽娜, 魏俊逸, 黄小毛, 等. 4LL-1.5Y 型履带式油菜联合收获机割台振动分析[J]. 安徽农业大学学报, 2019, 46(4): 723 - 727.
MA Li'na, WEI Junyi, HUANG Xiaomao, et al. Vibration analysis of cutting table of 4LL - 1.5Y crawler rape combine harvester[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2019, 46(4): 723 - 727. (in Chinese)
- [21] 李耀明, 庞靖, 徐立章, 等. 基于振动激励溯源的谷物联合收获机清选筛制造缺陷定位[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 10 - 17.
LI Yaoming, PANG Jing, XU Lizhang, et al. Manufacturing defect location of cleaning screen of grain combine harvester based on vibration excitation tracing[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(5): 10 - 17. (in Chinese)
- [22] EBRAHIMI R, ESFAHANIAN M, ZIAEI-RAD S. Vibration modeling and modification of cutting platform in a harvest combine by means of operational modal analysis[J]. Measurement, 2013, 46(10): 3959 - 3967.
- [23] PANG J, LI Y, JI J, et al. Vibration excitation identification and control of the cutter of a combine harvester using triaxial accelerometers and partial coherence sorting[J]. Biosystems Engineering, 2019, 185: 25 - 34.
- [24] CHEN S, ZHOU Y, TANG Z, et al. Modal vibration response of rice combine harvester frame under multi-source excitation [J]. Biosystems Engineering, 2020, 194: 177 - 195.
- [25] 徐立章, 李耀明, 孙朋朋, 等. 履带式全喂入水稻联合收获机振动测试与分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 49 - 55.
XU Lizhang, LI Yaoming, SUN Pengpeng, et al. Vibration test and analysis of tracked full-feed rice combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 49 - 55. (in Chinese)