doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.001

谷物联合收获机清选技术与装置研究进展

徐立章　李　洋　李耀明　柴晓玉　仇　解
(江苏大学农业装备工程学院, 镇江 212013)

摘要: 我国谷物联合收获机普遍存在作业性能和效率难以兼顾、适应性不强、信息化智能化程度较低等问题,清选装置作为联合收获机最核心的工作部件之一,直接影响着整机的作业性能。如何提高清选装置的性能和效率是现阶段谷物联合收获机技术发展的重点和难点。因此,本文从清选装置结构、清选装置内部气流场和物料运动及清选装置智能化技术等方面综述了国内外谷物联合收获机清选技术与装置的研究进展,分析阐述了联合收获机清选装置的发展趋势,以期进一步提高我国联合收获机清选装置的工作性能、作业效率和适应性。

关键词: 联合收获机; 清选装置; 研究进展
中图分类号: S225.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)10-0001-16

Research Progress on Cleaning Technology and Device of Grain Combine Harvester

XU Lizhang　LI Yang　LI Yaoming　CHAI Xiaoyu　QIU Jie
(*School of Agricultural Equipment Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: The grain combine harvesters of China generally exist problems such as low reliability, low adaptability, and low intelligence and informationize. The cleaning device is one of the core working components of the combine harvester, and its performance is an important factor that directly affects the performance of the whole machine. How to improve the performance and efficiency of the cleaning device is the difficulty and focus of the development of grain combine harvester at this stage. To this end, the research status of domestic and foreign combine harvesting technology and equipment was reviewed from the aspects of cleaning device structure, airflow field and material movement in the cleaning device and intelligent cleaning device. At present, in the basic structure of the combine harvester cleaning device, research was mostly concentrated on multi-fan, multi-layer vibrating screens, shaking plates, etc. In the aspect of the cleaning device fan structure, the fan performance, efficiency, and airflow uniformity of the air outlet were optimized by optimizing the fan volute, impeller, and multi-duct structure. In the aspect of cleaning sieve, the sieve surface structure and motion form of the vibrating screen were studied. In the research of the airflow field, a more complete simulation model can be established, and a more accurate airflow field measuring instrument can be established, so that the internal airflow field distributions of the simulation and experiment for cleaning device were closer to that of the real situation. In the research of material movement, the EDEM software was usually used to simulate the movement of material particles on vibration, which can reflect the movement law of materials to a certain extent, but still cannot reflect the internal material movement of the actual cleaning device. Most of the existing gas-solid two-phase flow in the cleaning device adopted the CFD - DEM software coupling method, but they all simplified the model as much as possible, which caused the numerical simulation results to be different from the actual test results. Most of the researches on the grain loss monitoring sensor adopted the principle of piezoelectric type, which had the characteristics of simple structure, high resolution and suitable for complex working environment. Modern control theory and method were adopted to make the cleaning loss automatically adapt to the working object and environment. The development trend of the combine harvester cleaning device was proposed: development in the direction of light weight; development in the

收稿日期: 2019-08-07　修回日期: 2019-08-21
基金项目: 国家自然科学基金项目(51875260)
作者简介: 徐立章(1979—),男,研究员,博士生导师,主要从事收获机械信息感知与精准作业研究,E-mail: justxlz@ujs.edu.cn

direction of low vibration and low noise; development in the direction of versatility; development in the direction of intelligence and informationize; acceleration of the development of industry, academia and research; cleaning device design by big data fusion. It had important reference significance for improving the working performance and efficiency of the cleaning device and the combine harvester, and further promoting the comprehensive high quality and high efficiency development of the mechanized harvesting of crops in China, which provided a basis for modern harvesting, intelligent harvesting and accurate harvesting.

Key words: combine harvester; cleaning device; research progress

0 引言

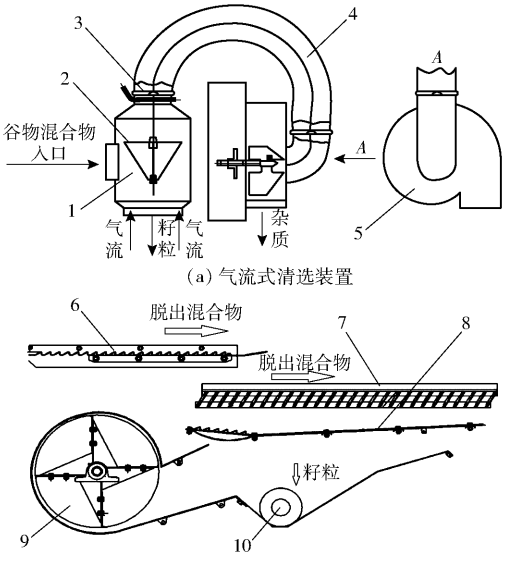
谷物联合收获机主要用于收获水稻、小麦、玉米、谷子等粮食作物以及油菜、大豆等部分经济作物,在田间一次作业可完成切割、脱粒、分离、清选、装袋或随车卸粮等若干项工序。联合收获机技术发展水平是体现农业现代化程度的一个重要标志。清选装置作为联合收获机的“消化系统”,其性能直接影响整机的工作性能与效率,其功用是将经脱粒装置脱粒分离出的脱出混合物中的颖壳、断穗、短茎秆等杂余清出机外,以获得干净的籽粒,清选后的籽粒含杂率和损失率也是衡量联合收获机产品质量的主要指标[1]。近年来,国外大型联合收获机的清选装置已基本实现信息化,国内大部分产品还处于对传统清选装置进行升级改装的阶段。目前,部分科研机构、高校、农机企业等开始研究信息化、智能化清选装置,并取得了诸多成果,为我国联合收获机清选装置的快速发展奠定了基础。

然而,随着联合收获机的割幅不断增大、农作物单产不断提高,清选装置性能已成为大喂入量工作环境下制约联合收获机工作效率提高的主要因素,因此有必要对现有清选技术与装置进行深入的分析和探讨。本文从清选装置结构、清选装置内部气流场和物料运动、清选装置智能化等方面,对国内外清选装置的研究现状进行总结,并对未来发展方向加以展望,以促进联合收获机清选装置不断改进与升级,满足现代化收获作业的要求。

1 清选装置结构研究进展

1.1 典型清选装置结构

清选装置的总体结构按其工作原理分为气流式和风筛式两大类(如图 1 所示)。气流式清选装置是根据待清选脱出混合物(简称脱出物)的空气动力特性进行清选,如气吸式、气吹式、旋风分离式[2]等纯气流式清选装置;风筛式清选装置是利用气流和筛子配合进行清选,即风筛式清选装置,相对应的风机类型有离心式风机、横流式(贯流式)风机等,筛子类型有鱼鳞筛、冲孔筛、编织筛、圆筒筛等[3]。对市场上 112 台不同品牌、不同型号的联合收获机采用的清选装置进行调研与统计后,得出清选装置不同总体结构所占比例,其中风筛式清选装置最为广泛,占比约 93%,因为这种清选装置具有适应性强、清选效率高、清选后的籽粒含杂率低等优点。而采用单纯气流清选原理的清选装置较少,仅占 7% 左右,且均为小型(约占总量 2.7%)或微型(约占总量 4.3%)联合收获机,额定喂入量均在 2 kg/s 以下,常用于山区、丘陵或微小田块的收获作业。虽然纯气流清选装置有结构简单、清选室体积小、振动与噪声小等优点,但其受结构和功率的限制,只依靠气流难以将长茎秆或湿度较大的杂余清除干净,含杂率较高,籽粒输送器易发生堵塞,清选效果并不理想[4-5],仅适用于作物喂入量较小的工况或中大型联合收获机难以到达的环境使用。对上述联合收获机采用的典型清选装置结构进行总结,如表 1 所示。



(a) 气流式清选装置

(b) 风筛式清选装置

图 1 清选装置总体结构示意图

Fig. 1 Overall structure diagrams of cleaning device

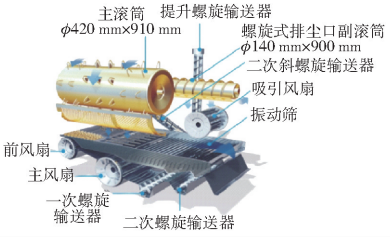
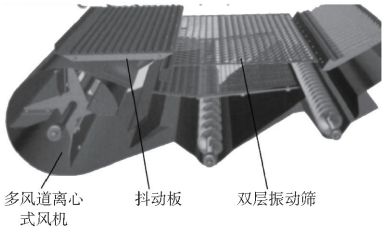
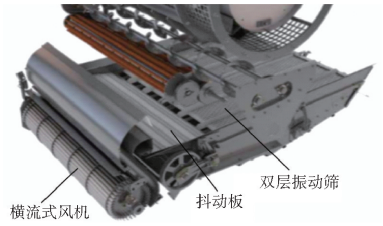
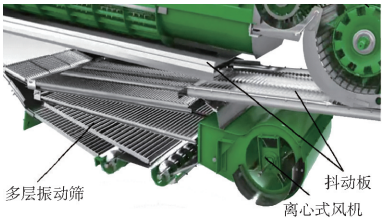
1. 清选筒 2. 倒锥挡筒 3. 风门 4. 吸风管 5. 吸风机 6. 抖动板 7. 鱼鳞筛 8. 编织筛 9. 离心式风机 10. 籽粒输送器

1.2 风机结构

现有联合收获机清选装置中使用的风机一般属于低压中速风机(全压小于 1 kPa,出口气流速度小于等于 20 m/s)[12],其主要原理是利用脱出混合物

表 1　典型清选装置结构

Tab. 1　Typical cleaning device structure

联合收获机型号	清选装置结构	结构示意图	主要特点
悦华 YH－SGJ 小型联合收获机[6]	离心式吸风机、清选筒		额定喂入量 0.8 kg/s，采用气吸式清选原理，茎秆、杂余经离心式吸风机排出，适用于丘陵、山区及平原套种小麦、水稻的联合收获作业，结构简单，振动小
洋马 AG600 型半喂入式联合收获机[7]	三风机系统、双层振动筛		由前离心风机、主离心风机、横流吸风机、双层振动筛组成，实现了多风道清选和二次清选，其内部的多层气流可以增加脱出物的扩散程度，能够减小籽粒含杂率，满足了收获高含水率、高秆水稻的需求
沃得 4LZ－5.0E 型联合收获机[8]	多风道离心式风机、双层振动筛、抖动板		在风机的出风口安装两个可调倾角的气流隔板，形成了三风道，满足振动筛前、中、后部的清选需求，振动筛面积相比前一代产品增大 15%，降低清选含杂率
AGCO S8 系列联合收获机[9]	横流式风机、双层振动筛、抖动板		采用横流式风机作为风源，横向方向上气流分布较均匀，与横轴流脱粒滚筒相配套使用，缩短了清选装置纵向长度，防止横流式风机远距离风压损失大，可满足 8 kg/s 以上喂入量的谷物收获需求
John Deere C440 型联合收获机[10]	离心式风机、多层振动筛、抖动板		采用了 4 层振动筛加 2 层抖动板的结构，显著增加了筛分面积，处理脱出物流量的能力相比双层振动筛提高了 40% 以上，加强了脱出混合物扩散分层效果，使得机器的喂入量高达 13 kg/s
CLAAS LEXION 系列联合收获机[11]	双出风口多风道离心式风机、三层振动筛、抖动板		3 个涡轮式双出风口多风道离心式风机串联在一排，具有气流速度稳定、气流衰减程度低、横向气流均匀等优点，再加上可自动调平的抖动板与振动筛，有效提高了清选性能和复杂地形适应性

中各成分的漂浮特性不同，使气流的作用力大于茎秆等杂余而小于籽粒的重力、摩擦力，以便把脱出混合物吹散、分层。目前，国内外联合收获机采用的风机结构主要分为离心式、横流式（贯流式）两种，二者的区别在于：离心式风机的气流按照平行于运转轴的方向，从轴心处注入叶轮，经过加速后以垂直于运转轴的方向离开风机，具有风压大、送风距离远、风量集中等特点；横流式风机的气流从垂直于运转轴的方向注入叶轮，其叶轮轴向宽度远大于叶轮直径，经过加速后同样以垂直于运转轴方向离开风机，具有轴向长度不受限制、横向出风较均匀、压头损失较大等特点。

通过对 112 台联合收获机样本进行统计，得出目前联合收获机大多采用离心式风机的结构，占比约为 77%，少部分采用横流式风机的结构或离心式加横流式组合式结构。采用横流式风机结构的联合收获机中仅有极小一部分能收获水稻，约占总量的 3.6%，其余用来收获小麦、玉米等旱作物，主要是因

为横流式风机产生的风压相对于离心式风机较低、气流衰减较快,对潮湿的水稻茎秆、籽粒、杂余等混合物进行有效分层与吹散的效果较差。采用离心式加横流式组合式结构的联合收获机市场占比约为8%,仅应用在一些半喂入式水稻联合收获机上,且离心式均作为主吹出风机、横流式均作为辅助吸风机,如久保田公司生产的 PRO488 型半喂入式水稻联合收获机。为提高清选装置中风机的效率、横向气流分布均匀性,减少气流衰减等,相关学者对风机结构方面做了一系列的研究。

1.2.1 离心式风机结构

(1)蜗壳

在远离风机出风口的蜗壳前部设置若干个进风孔,可通过进风孔增大进风量,在整个出风道范围内使风量和风压分布均匀,缓解物料在筛面的堆积问题[13];研究联合收获机风机的蜗壳扩张角、蜗舌距离,发现扩张角和蜗舌距离对效率及噪声影响很大,通过试验确定合理的扩张角应与气流出口角相等,最适宜的蜗舌距离与叶轮直径的比值应为 0.077 ~ 0.094[14];提出一种联合收获机所用的具有横流进风口的离心式风机,利用热线式风速仪对出风口风速进行了测量,通过研究风机出风口处的速度分布等参数得出此风机能够有效解决物料堆积问题[15];陈德俊团队设计了一种蜗壳为圆锥形的离心式清选风机,该风机的叶轮大端与小端的压力差可产生一定的横向风速,在横向方向上形成了非均布气流,可解决横置轴流式脱粒分离装置的脱出物在纵置的振动筛面上初始分布不均匀的问题[16-18]。

(2)叶轮

John Deere 公司设计了一种卷翼型清选风机,其叶轮由 12 片独立相同的卷翼型叶片组成,叶片通过幅盘连接为“前向后倾”的结构形式,此种风机的工作噪声小、进气损失小、出风口横向气流分布均匀,能使联合收获机的喂入量在原来基础上提高 0.5 kg/s 左右[19];New Holland 公司 TC5060 型联合收获机的风机采用了一种由 6 片加宽型叶片组成的叶轮,该离心式风机产生的风量更为强劲且均匀,覆盖范围较大,能够有效减轻上筛与下筛负荷,非常适合在工作负荷大的环境下使用[20];提出一种离心-轴流组合式风机,在传统离心式风机叶轮两端叶片切角的位置上安装了轴流叶片,试验表明采用此风机的联合收获机损失率相较以前减少 0.2%、含杂率减少 0.4%[21];通过研究不同叶轮的风机模型,包括四叶片有倾角、四叶片无倾角、六叶片有倾角和六叶片无倾角模型,得出风机叶片数为 6 片且无倾角时,横向气流分布相对比较均匀[22]。

(3)多出风口/风道

研究上下风道风速及其方向角对稻、麦混合物清选损失的影响规律,用最优化方法计算出最佳工作参数值[23-26];设计一种与斜置切纵流联合收获机清选装置相匹配的双出风口多风道离心式风机,该风机的多道吹出气流可有效对脱出混合物进行分层,如图 2 所示[27-28];对采用双出风口四风道和单出风口三风道离心风机的清选装置进行对比分析,得出双出风口四风道离心风机产生的气流对收获大喂入量工况具有更好的适应性[29];提出一种双风道六出风口离心式风机,分析了风机转速、风机入射倾角等参数的最优组合[30]。

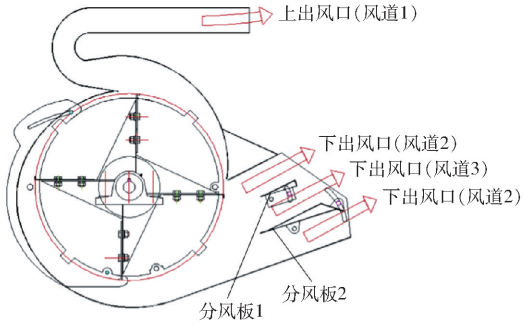


图 2 双出风口多风道离心式风机结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of multi-duct centrifugal fan with double outlets

1.2.2 横流式风机结构

(1)蜗壳

对两种不同蜗壳的横流风机(图 3)内部流场进行了非侵入式高分辨率测量,得出蜗壳内部空间充裕、进风口处蜗壳和叶轮间距较小的横流风机内部的风速和风压更高,此种蜗壳结构有利于提高清选装置的效率[31]。

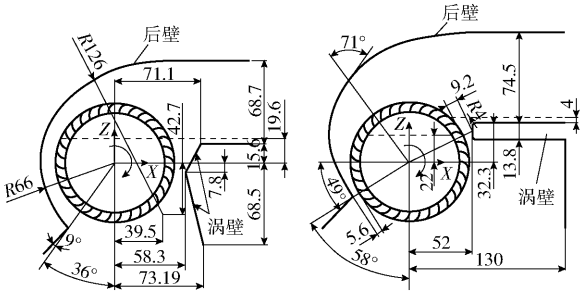


图 3 两种不同蜗壳的横流式风机

Fig. 3 Cross-flow fans with two different volutes

(2)叶轮

对横流式风机的结构参数进行分析,发现叶片外切角取 15.33°时性能较好,能满足联合收获机 1.5 kg/s 的清选负荷[32];设计一种采用前向圆弧叶片的横流式风机,并通过试验证明此风机的叶轮产生的气流速度更均匀[33];设计一种横流风机所用的人字变斜式叶轮,并根据人字变斜式叶轮优化蜗壳

几何形状，通过试验表明该风机满足预清选和风筛清选流场分布要求[34]。

(3)多出风口/风道

采用双风道横流式风机作为谷物联合收获机的风源，增大了气流吹出面积，更适应高速收获作业[35]。在清选装置风机结构方面，相关学者针对离心式的研究较多，通过优化风机蜗壳、叶轮，采用多出风口或多风道结构等方法，使清选装置的风机性能、效率、出风口气流均匀性有了较大的提升，更加适合联合收获机复杂的收获环境和大喂入量工况。但目前横流式风机研究和应用都较少，这是因为其产生的风压相对于离心式风机较低，较难对潮湿混合物进行有效分层和吹散。在今后的研究中，可以综合离心式和横流式风机优点进行结构设计，或研发参数可调的通用型风机，以适应不同的收获作物或不同喂入量环境。

1.3　清选筛及其驱动机构

清选筛是风筛式清选装置核心部件之一[36]，籽粒将透过筛面小孔被分离出来，而茎秆、杂余等无法穿透筛面小孔被排出。如图 4 所示，联合收获机常用的清选筛有：①鱼鳞筛，单筛的清选效果不理想，一般作为多层振动筛中的上筛使用，主要用于清除脱出混合物中的长茎秆等大杂余。②冲孔筛，在镀锌薄钢板上冲孔而成，孔的形状一般为圆形或长方形，筛分物料精准，筛孔不易变形，一般作为下筛使用，但有效面积小，不适宜于负荷大的清选工作。③编织筛，用镀锌铁丝编织而成，结构简单，有效面积大，但筛分物料不精准，筛孔容易变形，一般作为下筛使用。④鱼眼筛(贝壳筛)，只能单向筛选，向后推送轻杂物能力强，但效率较低，不适宜于负荷大的清选工作。⑤圆筒筛，工作部分为圆筒形，整个筛子绕筒体轴线回转，工作平稳、振动小、噪声低，但是其筛孔易堵塞、筛分效率低。

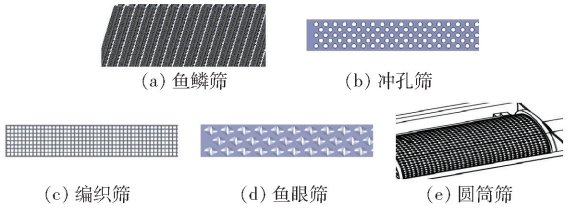


图 4　清选装置各类型筛子结构示意图

Fig. 4　Schematics of various types of screen for cleaning device

清选筛的性能及效率与其筛面结构、形状、材料等相关，此外清选筛的运动形式(往复式、回转式、多维振动筛)也是显著影响清选性能的因素，为进一步提高清选筛对大喂入量收获环境的适应性，防止发生堆积、堵塞、黏附现象，相关学者对其做了大量的研究。

1.3.1　往复式振动筛

(1) 筛面结构

进行基于平面筛面和凸柱筛面的谷物筛分实验，结果表明凸柱筛面有利于提高谷物的筛分效率和透筛率，但凸柱率不宜过大[37]；针对仿生非光滑油菜冲孔筛筛面进行研究，并和普通清选筛进行了田间对比试验，发现细小油菜物料不易与仿生非光滑筛面充分接触，起到减粘作用，仿生凸包的减粘作用较仿生凹坑明显(图 5)[38]；王立军团队[39-40]对玉米振动筛的筛面结构及参数进行研究与试验，以贝壳筛筛体结构为主要研究对象，得出各因素对筛分效率的影响由强到弱顺序为筛孔高度、筛孔纵向间距、筛孔长度；设计了贝壳圆孔组合孔筛体，组合孔筛的籽粒损失率比圆孔筛和贝壳筛分别减少了 5.79% 和 7.84%。

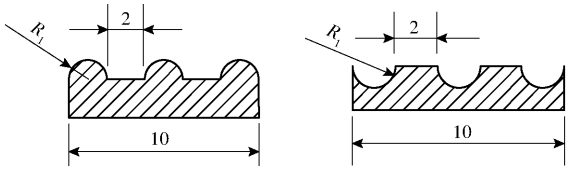


图 5　油菜筛面仿生凸包和凹包示意图

Fig. 5　Schematic of bionic convex and concave packs on rapeseed sieve surface

(2)形状

设计了一种联合收获机圆孔波浪型水稻清选筛装置，其上筛板为波浪型的筛板，上面均布有圆形筛孔，此清选筛不易堵塞，故障少，收集的籽粒干净[41]；提出一种正弦曲线玉米编织筛，试验表明正弦曲线筛可实现对杂余的快速推移，并提高籽粒透筛概率，籽粒清洁率可达 98.07%[42]。

(3)材料

采用新型聚氨酯橡胶筛代替金属筛，仿真表明聚氨酯橡胶筛更有利于玉米混合物的分散，进而提高筛面的使用效率，但尚未得到实际应用[43]。

1.3.2　多维振动筛

提出可实现三平移两转动运动的各种机构组合方式，此外推导出三平移两转动机构的运动数学模型，为多维振动筛的设计奠定了理论基础[44]；利用 LS-DYNA 研究两种新型多维运动筛面上籽粒的运动情况，通过物料分散性试验表明两种新型多维筛面运动形式有利于提高筛分效率[45]；设计基于并联机构的多维振动筛分装置，获得了多个工况下物料颗粒的筛分性能指标以及物料在筛面上的运动规律[46]；提出具有不同初始相位的三维并联水稻振动筛模型并进行了运动学分析，并开展了多因素正交试验分析，采用最佳组合参数后筛分效率提高

62.02%,含杂率降低 53.85%[47];研究基于并联机构振动筛的 8 种组合运动形式对谷物筛分的影响规律,提出筛分效果的评定方法,为多维振动筛面运动形式的选择提供了参考[48];对三移动两转动玉米振动筛(图 6)的驱动机构进行优化,试验表明,玉米籽粒在该机构筛面上的透筛率比其在平面往复振动筛上的透筛率提高了 5.75%[49]。

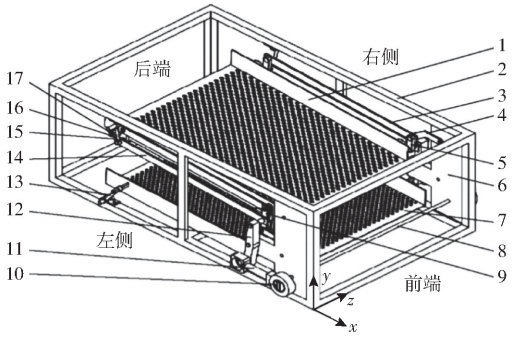


图 6 三移动两转动玉米振动筛结构示意图

Fig. 6 Schematic of corn vibrating screen with three translations and two rotations

1. 上筛 2. 机架 3. 上导杆 4. 限位杆 5. V 型杆 6. 侧板 7. 下筛 8. 主轴 9. T 型杆 10. 偏心轮 11. 连杆 12. 摇杆 13. 支撑杆 14. 下导杆 15. 吊杆 16. 球铰 17. 活动连杆

在清选筛研究方面,相关学者多针对振动筛进行研究,针对圆筒筛研究较少,这是由于圆筒筛易堵塞、筛分效率低,难以适应大喂入量和潮湿作物等作业环境,采用圆筒筛的联合收获机较少也说明了它的局限性。目前,振动筛筛面结构方面的研究大都在宏观上,从微观上对筛面的材料或结构进行的研究不多,运用也不成熟。在多维振动筛方面,其普遍存在着驱动机构复杂、稳定性不高等问题,还未开始实际运用。在今后研究中,可重点针对筛面进行仿生学研究,使其具有减粘作用,更适用于潮湿作物的收获;优化多维振动筛的驱动机构,减少安装复杂度,降低成本;开发自适应地形、可自动偏转角度的振动筛等。

1.4 清选装置结构配置

为在有限的清选室空间内不断提高清选装置的性能和效率,增强清选装置对大喂入量、高含水率、高草谷比等收获环境的适应性,相关学者对清选装置结构配置做了大量的研究。

(1)气流式清选装置结构配置

师清翔团队对适用于微型、小型联合收获机的清选装置研究较为深入,设计的一系列气流式清选装置具有体积小、振动低、功耗低的特点,而且清选性能满足收获要求[50-53]。

(2)风机振动筛结构配置

通过研究上层振动筛和抖动板之间上风道的合适高度,得出合适的上风道高度可使上层振动筛的物料移动速度增加,籽粒损失减少[54];将两个离心式风机分别安装于振动筛的上方和下方,通过理论和试验研究了上风机出风口平均风速和出风口高度对清选效果影响,得出风机最优的参数组合[55];采用两个斜向放置的横流式风机作为清选装置的风源,并且验证了这种新型结构的有效性,其产生的横向气流比较稳定、均匀[56];在振动筛后部下方安装一个小型离心式风机,如图 7 所示,主要吹向尾筛筛面,以提高尾筛筛面的风速,可有效辅助清选筛排出短茎秆,提高清选效果[57];对清选装置中具有流线型结构的弧板作为下抖动板进行分析,通过田间对比试验得出此流线型弧板对筛前段气流速度的提高具有明显效果[58];在抖动板上安装隔板导流条,发现双隔板抖动板物料分布较单隔板抖动板均匀,更加有利于筛分作业[59]。

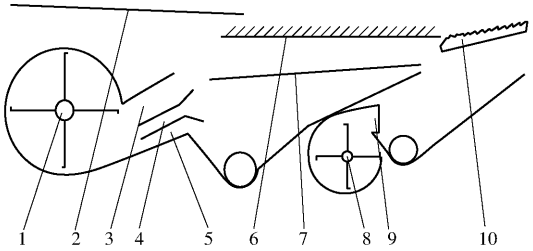


图 7 双风机清选装置结构示意图

Fig. 7 Structural diagram of double-fan cleaning device

1. 前风机 2. 波纹板 3. 上风口 4. 中风口 5. 下风口 6. 上筛 7. 下筛 8. 后风机 9. 后风口 10. 尾筛

(3)风机圆筒筛结构配置

廖庆喜团队设计了一种由差速圆筒筛与旋风分离清选装置组成的清选系统,振动小且可有效提高清选性能,田间试验表明清选系统籽粒总损失率平均值为 5.9%,满足油菜联合收获清选需要[60-61];设计圆筒筛式谷子清选装置,该装置主要由圆筒筛装置、横流风机和离心风机等组成,经过试验表明该装置籽粒含杂率与总损失率均低于传统风机圆筒筛式清选装置[62]。

对联合收获机清选装置结构配置的研究大都集中在多风机、多层振动筛、抖动板等,大部分是针对风筛式清选装置进行研究,相关学者在传统单风机、单层振动筛清选装置基础上,通过研究增加风机数量,如在横向方向上两个或两个以上的风机串联,在筛尾增加吸、吹风机等;通过研究多层振动筛,如两层或两层以上的不同筛面筛子、阶梯振动筛等;通过研究布置抖动板及导流条等方案来提高清选装置的性能和效率。纯气流式清选装置的局限性和缺点较明显,故研究与应用较少。此外,风机加圆筒筛的结构由于清选后的含杂率较高、易堵塞等,应用范围受

到限制。虽然风机加振动筛作为应用最广泛的清选装置结构发展已较为成熟，但是仍然普遍存在振动大、噪声大的缺点，这是由于其驱动机构为偏心轮机构或曲柄摇杆机构等、运动形式为往复式等造成，在后续的研究中可根据此问题进行改进，如优化振动筛的导轮和滑轨、减轻振动筛的重量、采用新型驱动机构等。

2　清选装置内部气流场和物料运动研究进展

2.1　气流场研究

气流场和清选性能有着密不可分的关系，优化清选装置内部气流场的分布对提高清选装置的性能有着重要的意义。随着计算流体力学(CFD)的发展和完善，相关学者开始利用其研究清选装置内部气流场，再结合试验测量，得出气流场分布模拟数据，主要有速度云图、压力云图、气流场速度矢量图等，旨在为研发与改进联合收获机清选装置提供依据。对相关文献进行整理、分类后，得出清选装置内部气流场研究成果如表 2 所示。

国内外学者对清选装置内部气流场开展了大量的试验与研究，主要采用 CFD 仿真和试验测量方法，但现有研究没有考虑脱粒装置中脱粒滚筒等部件旋转产生的气体流动情况，然而脱粒装置与清选装置处于同一个密闭空间内，田间作业时脱粒装置可能对清选装置内部气流场产生一定的影响。而且现有研究中所建立的清选装置流道模型不完善，与实际内部结构或尺寸差距较大，可能造成数值模拟结果与试验结果有较大的差距。此外现有研究中采用的气流场测量试验方法也存在着不足，被测气流场易受到干扰，产生人为误差。在后续清选装置气流场研究中，建立更加完善的仿真模型、采用更为精准的气流场测量仪器，使仿真和试验的清选装置内部气流场分布更接近于真实情况，可减少研发周期与成本。

表 2　清选装置内部气流场研究成果

Tab. 2　Research findings of airflow field in cleaning device

研究方法	研究内容	总结
PIV 气流场测量	搭建清选装置试验台架，利用 PIV 系统对台架内部气流场的分布进行测定[63]	PIV 试验结果与真实情况一致性较高，能在同一瞬态记录下大量空间点上的速度分布信息，但成本较高，需要搭建专门的测量台架
布点气流场测量	在清选装置内部安排若干个试验测点，通过风速仪对测点进行气流速度测量，根据测量数据绘制出气流场分布情况[64]；采用风速仪测出清选室内多个点位的风速，分析风机转速、出风口倾角对气流场涡心位置变化的影响[65]；采用热线式风速仪对清选装置内部无脱出物和 1 ~ 4 kg/s 脱出物喂入量工况分别进行气流场测量，得出喂入量变化对振动筛上、下方气流速度的影响规律[66]	一般采用转轮式或热线式风速仪对清选室内部布置的若干测点进行测量，方便、成本低，但无法准确反映完整的清选装置内部气流场分布，可作为设计参考
气流场 CFD 仿真	运用 CFD 软件对清选装置内部气流场与灰尘流场进行数值模拟，分析其结构改进的合理性[67]；对 ANSYS 软件中的流体动力学分析方法进行总结概括，以清选装置为例具体描述其操作过程[68]；对纯气流式谷物清选装置进行研究，借助 Fluent 软件对清选室内部气流场进行了数值模拟，表明清选室内部的气流场能够满足谷物清选需求[69 - 70]	能较准确地得出清选装置内部完整的气流场分布情况，为清选装置的优化设计提供了较大的参考价值，可减少设计成本、缩短研发周期，但也存在着仿真理想环境与实际存在误差等缺点
气流场 CFD 仿真与测量试验	研究风筛式清选装置的参数对其内部气流和清选性能的影响，进行气流场数值模拟和测量试验，并进行额定喂入量下的清选性能试验，提出在额定工况下调整参数的方法[71]	气流场仿真与试验测量结果相互验证，既能得出仿真数据误差，又能弥补布点测量不能完全反映气流场的缺点
气流场影响因素分析	研究风力因素与清选气流场、清选气流场与清选效果、风力因素与清选效果之间的关系模型，通过预测试验结果表明，所建立的 3 个模型是有效的[72]	通过多因素试验等方法研究影响气流场分布的因素，可用于清选气流场和清选效果的预测和控制

2.2　物料运动研究

振动筛不同的结构参数与运动参数将对筛分效率、籽粒含杂率和籽粒损失率构成影响。因此有必要针对清选装置振动筛部分的分离清选情况作进一步研究与优化。不论是借助人为经验还是根据各种设计指导手册设计出来的振动筛，都无法直观明了地观察到振动筛的筛分情况与设计效果，必须通过设计与搭建试验台进行试验验证，这对于要求设计与开发周期较短的项目是一个比较大的影响。随着计算机技术的迅速发展，可以借助更快捷、有效的数值模拟技术来分析物料在振动筛上的运动过程，对于缩短设计周期与费用方面都有积极意义。对相关文献进行整理、分类后，得出清选装置内部物料运动研究成果如表 3 所示。

在物料运动研究上，学者多采用高速摄影或 EDEM 软件对物料颗粒在振动上的运动进行试验和

表 3 清选装置内部物料运动研究成果

Tab. 3 Research findings of material movement in cleaning device

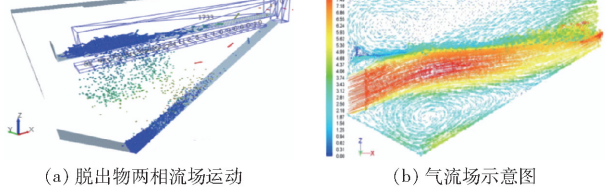
研究方法	研究内容	总结
物料运动高速摄影	设置不同的清选室气流入口速度和入口角度,利用高速摄像设备对作物的运动轨迹进行拍摄,发现改善气流入口速度和入口角度可以提高清选效率[73];利用高速摄像装置分析不同工况参数对分离筒内物料运动状态的影响机理,风机转速和通气孔直径对分离筒内混合物料的运动状态有明显的影响[74]	高速摄影能直观反映出真实的物料运动,但无法获取受力等运动参数,而且后续的图像处理方法也不完善,较难获得整个清选装置三维空间内的物料运动规律,可作为研究中的辅助分析手段
DEM 物料运动仿真	采用离散单元法(DEM)建模技术,对作物种子筛选分离过程进行研究,得出不同粒径大小的作物在不同振动筛筛孔直径下的筛分效率[75];采用 EDEM 软件对玉米清选过程进行模拟仿真,针对玉米清选装置作业参数(振幅、频率、振动方向角)对筛分效率的影响进行研究[76];利用 EDEM 软件对振动筛在不同参数条件下进行单因素仿真试验及均匀试验,得到各参数与筛分效率、洁净率和损失率间的关系[77]	DEM 数值模拟方法可以直接得到试验中较难得到的物料颗粒运动轨迹、受力等参数,对优化、设计振动筛有重要的帮助,目前在仿真模型建立精度上还有进一步提高的空间,使其更接近实际清选情况
DEM 物料运动仿真与清选性能试验	李耀明团队通过数值模拟仿真、理论分析、清选性能试验等方法建立了物料与振动筛面的碰撞运动模型,揭示了物料的透筛过程,获得了清选筛面上物料的非线性运动规律,并分析了不同工作参数对物料运动的影响规律,取得了一系列成果,为风筛式清选装置的结构调整和参数优化设计提供了理论和试验依据[78-85]	在 DEM 物料运动仿真的基础上,进行了理论分析和清选性能验证试验,一般通过 DEM 物料运动仿真和理论分析方法优化振动筛,通过清选性能试验间接验证优化效果,但因为仿真未考虑气流场的作用而存在一定的误差

数值模拟。高速摄影能直观反映出真实的物料运动,但无法获取受力等运动参数,而且后续的图像处理方法也不完善,较难获得整个清选装置三维空间内的物料运动规律,可作为研究中的辅助分析或观察手段。而 EDEM 数值模拟可在一定程度上反映出物料的运动规律,但目前仍存在着仿真精度不高、无法反映出真实的清选装置内部物料运动情况等问题,这是由于振动筛建模经过大量简化、物料颗粒大幅缩减、内部无气流作用等原因造成的。为准确得到物料真实运动规律和受力情况,可采用气固两相流研究方法,并进一步完善清选装置和物料颗粒模型。

2.3 气固两相流研究

在清选装置中,既有气流对物料颗粒运动的影响,也有颗粒对气流的影响,同时还有颗粒与颗粒之间的碰撞,它是一种复杂的气固两相流动,在气流和颗粒间存在着复杂的动量交换。采用计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)和颗粒离散元(Discrete element method, DEM)耦合的方法可模拟出清选装置中物料的运动状态,为深入研究物料在清选装置中的运动规律奠定了基础,有利于进一步改进与提高清选装置的性能。

近年来,国内外相关学者对清选装置气固两相流方面的研究逐渐增多,例如:采用 Fluent 软件对旋风分离式清选装置进行气固两相流耦合仿真,模拟出分离器中杂质在气流作用下的运动轨迹,证明此方法运用在清选装置分析上是可行的[86];对风筛式清选装置进行 Fluent 与 EDEM 软件耦合仿真,得到脱出物在清选室内的运动规律,如图 8 所示[87-88];利用 Fluent 与 EDEM 软件耦合的方法对联合收获机清选分离室进行数值模拟,得到脱出物颗粒运动轨迹,此外在搭建的台架上进行试验,仿真与试验结果均表明谷物清洁率随着分离室入口气流速度的增大而不断提高[89];利用 Fluent 与 EDEM 软件耦合方法对旋风分离筒进行数值模拟与研究,分析结果为麦粒停留在分离筒锥体部分的时间过长,影响工作效率,需要对其进行重新设计[90];以贯流式风机风速、贯流式风机倾角、振动筛频率和振动筛振幅 4 个因素设计正交试验表,用 Fluent 与 EDEM 软件耦合方法对建立的正交试验表进行数值模拟,得出 4 个因素对清洁率都有极显著的影响,影响主次顺序为风机风速、风机倾角、筛子频率、筛子振幅[91];采用 Fluent 与 EDEM 软件耦合方法对玉米联合收获机清选装置进行单因素与多因素仿真试验,发现籽粒透筛概率随着清选装置入口风速和筛面倾角的增大而降低,籽粒平均透筛时间随着风速的增大呈现减小的趋势,随着振动频率的增大呈现先减小后增大的趋势,随着筛面倾角的增大呈现增大的趋势[92]。



(a) 脱出物两相流场运动 (b) 气流场示意图

图 8 风筛式清选装置气固两相流仿真结果

Fig. 8 Simulation results of gas-solid two-phase flow in air-screen cleaning device

目前，清选装置内部气固两相流的研究绝大部分采用 Fluent 和 EDEM 软件耦合方法，少部分研究采用单 Fluent 软件进行气固两相流耦合，此种方法无法建立真实的物料形状，无法准确建立物料与物料、物料与气流之间的相互作用力，有一定的局限性。Fluent 和 EDEM 软件耦合方法可较准确反映出清选装置中气固两相流运动，并且可较直观得到清选装置气流场分布与物料运动轨迹，为分析及设计改进清选装置提供较大便利，但现有研究仍存在不足之处，比如将清选室模型简化、脱出物建模简化、脱出物模型数量呈比缩减等，这些都可能造成数值模拟结果与实际试验结果有一定的差异，此外，关于清选装置内部脱出物颗粒群的运动规律理论研究还较不成熟，对气固两相流数值模拟结果的分析还不够透彻，今后可对这些问题进行更加深入的研究。

3　清选装置智能化技术研究进展

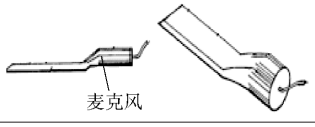
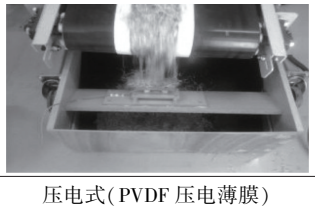
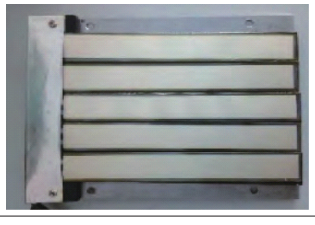
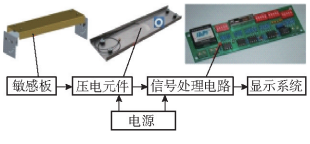
3.1　清选损失监测传感器

早在 20 世纪 60 年代，许多发达国家便开始研究联合收获机的清选损失监测传感器[93]。MOSTOFI[94]将谷物损失监测仪（KEE）安装在 John Deere 955 联合收获机的振动筛后面，测定了清选损失等参数，对配备谷物损失监测仪的联合收获机进行了小麦收获评价。目前，国外先进的联合收获机如美国 John Deere 公司生产的 JD9660STS 型联合收获机，Case 公司生产的 Case2366IH 型联合收获机，英国 Ferguson 公司生产的 Ferguson860 型联合收获机均已配备了清选损失监测传感器，用来监测联合收获机收获中籽粒损失实况，帮助驾驶员及时了解、掌握脱粒分离后籽粒损失的情况[95-96]。自 20 世纪 90 年代起我国科研工作者对清选损失监测技术进行了研究，祁广云、王新忠等[97-98]相继提出监测方案。近 10 年研究逐渐深入，传感器的监测准确率、稳定性也逐步提升。本文对相关文献进行整理、分类后，得出清选损失监测传感器研究成果如表 4 所示。

关于清选损失监测传感器的研究大部分采用压电式的原理，具有结构简单、分辨精度较高、适合复杂工作环境的特点。目前，国外的清选损失监测传感器已实现了商品化，大规模运用在市场联合收获机上，我国的清选损失监测传感器还停留在研发阶段，没有大面积推广应用，但相关研究已较为成熟，研制的传感器已达到市场需求，逐步开始了市场推广。在后续的研究中，可以突破通用型清选损失监

表 4　清选损失监测传感器研究成果

Tab. 4　Research findings of cleaning loss monitoring sensor

监测原理（敏感元件）	研究内容	总结
声电式（高灵敏的麦克风） 	利用声电原理，采用高灵敏的麦克风监测籽粒和茎秆等物料冲击感应板的声音信号，通过对声音信号的采样、放大、滤波等处理获得籽粒信号，可得到籽粒冲击个数[99]	由于机械振动、内部噪声等干扰，传感器的精度较差，不适用于清选损失实时监测
压电式（压力传感器） 	使用压力传感器测量谷物损失，通过分析物料在传感器上的响应，分辨损失谷物，并通过田间试验验证有效性，但试验过程中的分辨率不高[100]	传统的压力传感器对籽粒、茎秆、杂余的分辨能力较低，且响应时间较长，在清选损失监测上有很大的局限性
压电式（PVDF 压电薄膜） 	以 PVDF 压电薄膜为敏感元件设计了列阵式籽粒损失监测系统，通过选用不同含水率的水稻籽粒对研制的籽粒损失监测传感器进行了标定[101]；设计一种由冲击传感器、信号处理电路等组成的玉米收获机清选损失监测装置，并采用支持向量机多分类算法提取玉米籽粒冲击信号，实现了玉米籽粒损失的实时监测，平均相对误差为 12.98%[102]	压电薄膜质轻，非常柔软，极其耐用，在目前清选损失监测传感器研究中运用的较多，灵敏度较高，在国外部分大型联合收获机上已经得到实际运用
压电式（YT-5 型压电陶瓷） 	李耀明团队建立了清选损失监测模型，研制出 PVDF、YT-5 型压电陶瓷整板式/多板式等一系列水稻、油菜联合收获机清选损失监测传感器，并通过优选边界条件、增加系统约束阻尼等方式提高了传感器的检测精度和响应频率，通过田间试验测得作物收获的清选损失误差在 5% 内，监测准确率较高[103-108]	压电陶瓷敏感性很高，可以将极其微弱的机械振动转换成电信号，适合用于区别大量籽粒与茎秆、杂余冲击的环境，根据此材料研制清选损失监测传感器精度已超过 PVDF 压电薄膜，能够满足田间实时监测需求

测传感器,建立典型作物品种属性数据库和信号处理分析库,使得同一个传感器能满足水稻、小麦、油菜、玉米等不同作物的损失监测要求。

3.2 自适应控制系统

联合收获机清选装置受不同作物收获作业工况影响差异显著,难以保证实际作业性能的稳定性,损失率高,易发生堵塞,通过实时监测清选装置作业状态,自动调控清选装置作业参数,既可以保证作业性能、提高作业效率,提高对不同作物的收获适应性,又可以提高整机的作业可靠性和无故障作业时间。与欧美跨国公司先进的联合收获机相比,我国联合收获机大都仅安装有堵塞、粮箱满等少量报警装置,普遍缺乏清选装置工作参数与作业性能监测装置,使得机器作业效率依赖驾驶员的熟练程度,且操纵强度大,无法满足我国农作物规模化生产及稻油(麦)轮作区抢收抢种等作业要求[109]。近年来,国内外学者在联合收获机智能化控制技术方面的研究成果如表 5 所示。

表 5 清选装置自适应控制研究成果

Tab. 5 Research findings of self-adaptive control for cleaning device

研究方法	研究内容	总结
PID 控制	设计振动筛负荷-传输速度双闭环控制系统,传输速度控制器采用传统的 PID 控制,负荷控制器采用模糊控制与传统 PID 控制相结合的双模控制,对振动筛负荷控制系统进行了谷物分布密度阶跃扰动试验,试验结果表明控制器能有效抑制外部扰动,获得期望的控制效果[110]	PID 在控制非线性、时变、耦合及参数和结构不确定的复杂过程时,效果不是很理想,因此采用单纯的 PID 控制难以运用在多参数、非线性、复杂的清选过程中
模糊控制	基于实验数据和模糊控制技术,建立籽粒损失率、含杂率等非线性预测模型及控制方法,具有较好的适应性[111-112];采用模糊控制技术研究清选装置离心风机转速控制的控制算法,经过试验表明该控制器能满足清选要求[113];提出一种联合收获机自适应清选控制装置及其自适应清选方法、清选筛筛片开度自适应调节方法等,能够根据作业过程中的作业质量自动调整各种工作参数,提高生产效率[114-115];针对模糊控制系统方案进行硬件设计,主要包括风机转速、筛箱驱动转速等关键转速检测及调节,搭建脱粒清选监控系统实验台进行试验,证明监控系统的有效性[116]	适用范围广、对时变负载具有一定的鲁棒性,是一种非线性控制,较适合用于清选工作参数多、环境复杂的收获环境,是实现清选装置工作参数自适应控制的基础之一
神经网络控制	建立风机转速、振动筛结构参数和运动参数与清选效果之间的 BP 神经网络模型,并用试验数据进行了预测检验,表明网络模型具有较高的预测精度[117];建立 2 个风力因素(离心风机转速和出风角)与清选气流场分布之间、清选气流场分布与清选效果之间以及 2 个风力因素与清选效果之间 3 个 BP 神经网络模型,用试验数据证明网络模型的有效性[118]	用于非线性系统的辨识和估计,对于复杂不确定性问题具有自适应能力,快速优化计算能力,具有分布式储存能力,可实现在线、离线学习,适合用于清选装置工作参数自适应调节

目前,关于联合收获机自动控制的研究相对较少,现有的研究主要以清选损失率、籽粒含杂率为监测对象,以风机转速、振动筛振动频率、鱼鳞筛筛片开度等清选装置参数作为被控对象。部分研究者将预测控制、模糊控制、自适应控制、神经网络控制等智能控制新技术应用到联合收获机自动控制中,为研究联合收获机作业状态的自动控制提供了新思路。清选过程工况复杂、作业性能影响因素众多,因此,采用现代控制理论与方法,使清选损失能自动适应作业对象和环境的变化,是提高机器收获适应性的新途径,也是清选装置未来发展的必经之路。

4 发展趋势分析

(1)向高性能、高效率和高可靠性方向发展

随着农作物单位产量的不断提高,需要进一步深入研究清选装置的结构参数、运动参数、脱出物与清选装置耦合过程,以理论指导设计,在有限的清选空间内不断提高联合收获机清选装置的性能及效率;风筛式清选装置由于既包含旋转又包含往复工作部件,加之存在控制加工成本等因素,普遍存在工作时会产生较大的振动和噪声问题,不仅影响清选装置的可靠性和使用寿命,还影响驾驶员工作的舒适性,可采用先进的减振、隔振、隔音装置或低振动机构,优化清选装置框架和运动部件,使其固有频率避开激振频率,避免共振现象的发生,提高清选装置的可靠性和驾驶员的舒适性。

(2)向通用性方向发展

实现清选装置结构的通用化,乃至联合收获机整机的通用化。用户在购买通用机型的基础上,另外再选购少许几个清选装置部件或其他总成,可根据作业需要任意变更、拆装,组合成水稻、小麦、油菜、玉米等各类型联合收获机,提高适应性,降低生产和使用成本;实现清选装置损失监测传感器的通用化,现有籽粒损失监测装置用于不同作物时,需要多次标定、使用不便,研制通用型籽粒损失监测传感器,建立典型作物品种属性数据库和信号处理分析

库，使得同一个传感器能满足水稻、小麦、油菜、玉米等各类型联合收获机监测需求。

(3)向智能化方向发展

要求清选装置中风机转速、振动筛振动频率、清选损失率等参数能够实时在线监测与显示，生成实时的损失分布图，进一步实现远程监测，为相关部门提供各地区粮食损失等准确信息，为企业、驾驶员、农户等提供清选装置实时工作状态以及维修保养提示；要求清选装置能够根据收获过程中的作业环境与质量(喂入量、清选损失率、籽粒含杂率等)自动实时调整主要清选工作参数(风机转速、鱼鳞筛开度、分风板倾角等)，以使作业质量始终维持在良好的范围内。

参 考 文 献

[1] 镇江农业机械学院. 农业机械学：下册[M]. 北京：中国农业机械出版社, 1981.

[2] 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 separating cleaning unit of combine harvesters[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2016,54(5)：8－13. (in Chinese)

[3] 李洋. 多风道清选装置中气固两相流的数值模拟与试验[D]. 镇江：江苏大学, 2017.
LI Yang. Numerical simulation and experiment of gas-solid two-phase flow in multiple-ducts cleaning device[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)

[4] 沈宇峰, 吴明亮, 官春云, 等. 小型联合收获机清选装置研究现状及发展对策[J]. 农机化研究, 2016, 38(10)：263－268.
SHEN Yufeng, WU Mingliang, GUAN Chunyun, et al. Study status and developmental strategies of cleaning device of small combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(10)：263－268. (in Chinese)

[5] 李银海. 微型联合收割机气流式清选装置的仿真研究[D]. 南京：南京农业大学, 2008.
LI Yinhai. On the simulant research of the pneumatic cleaning mechanism of mini-combine harvester[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2008. (in Chinese)

[6] https://detail.1688.com/offer/598807913314.html?spm=a2615.7691456.autotrace-offerGeneral.13.a2db15e9gT8347[OL].

[7] 晓周. 洋马 AG600：超级半喂入联合收割机[J]. 农业机械, 2006(3)：55.

[8] http://www.worldnyjx.com/content/?906.html[OL].

[9] http://www.gleanercombines.com/products/combines/s8-super-series.html[OL].

[10] https://www.deere.com.cn/zh/谷物收获机械/联合收割机/c440 联合收割机[OL].

[11] https://www.claas.de/blueprint/servlet/blob/1922846/3786cf3f81793de8c8863b2d33dc912d/359108-23-dataRaw.pdf[OL].

[12] 孙国建, 李耀明, 徐立章. 风筛式清选装置中离心风机的研究现状及趋势[J]. 农机化研究, 2014, 36(1)：242－246.
SUN Guojian, LI Yaoming, XU Lizhang. Applications and researches of the centrifugal fan in the air-and-screen cleaning device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(1)：242－246. (in Chinese)

[13] 焦中元, 张桂萍, 王新强, 等. 联合收割机用离心风机：CN2813954Y[P]. 2006－09－06.

[14] 门艳忠, 郑文忠, 周东莉. 4ZTL－1800 联合收获机风机壳体参数的研究[J]. 农机化研究, 2002, 24(2)：45－46.
MEN Yanzhong, ZHENG Wenzhong, ZHOU Dongli. A study on the fan shell parameters for 4ZTL－1800 combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2002, 24(2)：45－46. (in Chinese)

[15] GEBREHIWOT M G, BAERDEMAEKER J D, BAELMANS M. Effect of a cross-flow opening on the performance of a centrifugal fan in a combine harvester：computational and experimental study[J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2)：247－256.

[16] 陈霓, 黄东明, 陈德俊, 等. 风筛式清选装置非均布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)

[17] 周璇, 王志明, 陈霓, 等. 圆锥形风机清选室气流场数值模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(3)：91－100.
ZHOU Xuan, WANG Zhiming, CHEN Ni, et al. Numerical simulation and experiment of airflow field of cleaning room under action of conical fan[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3)：91－100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20190309&flag=1. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.009. (in Chinese)

[18] 王志明, 吕彭民, 周璇, 等. 4LZS－1.8 型联合收割机脱分选系统性能正交试验[J]. 吉林农业大学学报, 2017, 39(3)：112－117.
WANG Zhiming, LÜ Pengmin,ZHOU Xuan, et al. Performance of threshing separating cleaning unit of 4LZS－1.8 combine harvester based on orthogonal experiment[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2017, 39(3)：112－117. (in Chinese)

[19] 韩滨, 徐伟城, 刘丹. 联合收割机清选系统卷翼型风扇[J]. 现代化农业, 2003(9)：35.

[20] 纽荷兰 TC5060 型联合收割机[J]. 农业机械, 2013(11)：103.

[21] 汤楚宙, 张小英, 欧阳中和, 等. 离心-轴流组合式清粮风机的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10)：117－120.
TANG Chuzhou, ZHANG Xiaoying, OUYANG Zhonghe, et al. Experimental research on the combined centrifuge-aerofoil grain cleaning fan[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(10)：117－120. (in Chinese)

[22] 王乐刚, 焦中元, 赵光军. 风筛式清选装置离心风机气流场仿真分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2017,55(8)：10－14.

WANG Legang, JIAO Zhongyuan, ZHAO Guangjun. Simulation analysis of centrifugal fan in air screen type cleaning device [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2017,55(8): 10 - 14. (in Chinese)
[23] 申德超, 郝心亮, 李宝成, 等. 离心风机双风道清选部件清选小麦、水稻脱出物台架试验研究[J]. 佳木斯工学院学报, 1987(2):79 - 86.
[24] 申德超. 离心风机双风道清选部件的探讨[J]. 农机化研究, 1988,10(2): 17 - 22.
[25] 申德超. 双风道清选装置试验研究[J]. 农业机械学报, 1991,22(4):38 - 45.
[26] 申德超, 李秉仁, 孙来思, 等. 双风道清选装置在谷物联合收获机上应用[J]. 农业机械学报, 1995,26(4):151 - 155.
[27] 于丽娟. 双出风口多风道清选装置的设计及试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2015.
YU Lijuan. Design and experimental study in cleaning device with double outlet and multi-duct[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2015. (in Chinese)
[28] LIANG Zhenwei, LI Yaoming, JOSSE De B, et al. Development and testing of a multi-duct cleaning device for tangential-longitudinal flow rice combine harvesters[J]. Biosystems Engineering,2019,182: 95 - 106.
[29] 李洋, 徐立章, 梁振伟. 双出风口四风道清选装置内部气流场仿真及试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(7):7 - 12.
LI Yang, XU Lizhang, LIANG Zhenwei. Simulation and experiment of airflow field in cleaning device with double outlets and four ducts[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(7):7 - 12. (in Chinese)
[30] 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 experiment of mixed flow field on longitudinal 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? file_no=20160719&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.019. (in Chinese)
[31] CASARSA L, GIANNATTASIO P. Experimental study of the three-dimensional flow field in cross-flow fans[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 35(6):948 - 959.
[32] 邱先钧. 贯流风机在联合收割机中的应用及其设计[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1):110 - 112.
QIU Xianjun. Design and application of cross flow blower in combines[J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(1):110 - 112. (in Chinese)
[33] 唐忠. 风筛式清选装置中贯流风机的特性及试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.
[34] 王长宁, 宁学贵, 王潮璐. 联合收获机双风道人字变斜式叶轮横流风扇[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊2): 17 - 21.
WANG Changning, NING Xuegui, WANG Chaolu. Design and test of combine harvester cross-flow fan with double channels and herringbone variable inclined impeller[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2):17 - 21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=2013s204&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.004. (in Chinese)
[35] 郑宇虎, 薛江涛. 一种高速谷物联合收获机: CN103141212A [P]. 2013 - 06 - 12.
[36] 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 cleaning unit of cereal combine harvesters[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016, 38(2):6 - 11. (in Chinese)
[37] 李菊, 王增彪, 沈惠平, 等. 凸柱筛面并联振动筛的谷物筛分试验与分析[J]. 机械设计与研究, 2016,32(1):150 - 154.
LI Ju, WANG Zengbiao, SHEN Huiping, et al. Experiment and analysis of parallel vibrating sieve with convex column screen surface on grain screening[J]. Machine Design and Research,2016,32(1):150 - 154. (in Chinese)
[38] 马征, 李耀明, 徐立章. 仿生非光滑筛面近筛层微观气流场研究[J]. 农业机械学报, 2011,42(增刊):74 - 77.
MA Zheng, LI Yaoming, XU Lizhang. Micro flow field on adjacent screen of bionic nonsmooth cleaning screen[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.):74 - 77. (in Chinese)
[39] 王立军, 张传根, 丁振军. 玉米收获机清选筛体结构优化[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9):108 - 114.
WANG Lijun, ZHANG Chuangen, DING Zhenjun. Structure optimization of cleaning screen for maize harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(9):108 - 114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160916&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.016. (in Chinese)
[40] 王立军, 冯鑫, 郑招辉, 等. 玉米清选组合孔筛体设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019,50(5):104 - 113.
WANG Lijun, FENG Xin, ZHENG Zhaohui, et al. Design and test of combined sieve of maize screening[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(5): 104 - 113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20190512&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.012. (in Chinese)
[41] 章伟华, 王战飞, 慎孙杰, 等. 一种联合收割机圆孔波浪型清选筛装置: CN205993141U [P]. 2017 - 03 - 08.
[42] 王立军, 武振超, 冯鑫, 等. 玉米收获机清选曲面筛设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(2):97 - 108.
WANG Lijun, WU Zhenchao, FENG Xin, et al. Design and experiment of curved screen for maize grain harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(2):97 - 108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190210&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.010. (in Chinese)
[43] 王立军, 彭博, 宋慧强. 玉米收获机聚氨酯橡胶筛筛分性能仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 90 - 96.

WANG Lijun, PENG Bo, SONG Huiqiang. Cleaning of maize mixture based on polyurethane rubber sieve[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 90 - 96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180711&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.011. (in Chinese)

[44] LEE C C, JACQUES M H. Translational parallel manipulators with doubly planar limbs[J]. Mechanism & Machine Theory, 2006, 41(4): 433 - 455.

[45] 马履中, 林钰珍, 杨文亮, 等. 基于籽粒运动的多维振动筛分效率分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 62 - 66.
MA Lüzhong, LIN Yuzhen, YANG Wenliang, et al. Efficiency of the dimensional vibration sieve based on the movements of grains[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 62 - 66. (in Chinese)

[46] 王成军, 李耀明, 马履中. 基于并联机构的多维振动筛分试验台设计[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 70 - 74.
WANG Chengjun, LI Yaoming, MA Lüzhong. Design of multi-dimensional vibration screening test bench based on parallel mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 70 - 74. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20120415&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.015. (in Chinese)

[47] 李耀明, 刘晓飞, 马征, 等. 不同支链初始相位的三维并联筛分性能研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 93 - 100.
LI Yaoming, LIU Xiaofei, MA Zheng, et al. Investigation on three-dimensional parallel screening performance based on initial phase of different branches[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 93 - 100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170911&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.011. (in Chinese)

[48] 李菊, 赵德安, 沈惠平, 等. 基于 DEM 的谷物三维并联振动筛筛分效果研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(8): 1018 - 1022.
LI Ju, ZHAO Dean, SHEN Huiping, et al. Research on screening effect of grain three dimensional parallel vibrating screen based on DEM[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(8): 1018 - 1022. (in Chinese)

[49] 王立军, 段良坤, 郑招辉, 等. 三移动两转动振动筛驱动机构优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 138 - 145.
WANG Lijun, DUAN Liangkun, ZHENG Zhaohui, et al. Optimization and experiment on driving mechanism of vibrating screen with three translations and two rotations[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 138 - 145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180616&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.016. (in Chinese)

[50] 师清翔, 许泽宇, 耿令新, 等. 新型谷物输送-分离-清选复合装置[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2017, 38(1): 61 - 66.

[51] 周学建, 袁华杰, 闫卫红, 等. 联合收获机吸杂口偏置型旋风分离清选装置试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 80 - 85.
ZHOU Xuejian, YUAN Huajie, YAN Weihong, et al. Performance experiment on cyclone separating device based on off-centered inlet scoop[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 80 - 85. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140813&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.013. (in Chinese)

[52] 师清翔, 张晓博, 耿令新, 等. 微型谷物联合收割机清选系统试验[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2015, 36(5): 82 - 86.

[53] 刘师多, 张利娟, 师清翔, 等. 微型小麦联合收获机旋风分离清选系统研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 45 - 48.
LIU Shiduo, ZHANG Lijuan, SHI Qingxiang, et al. Experimental research on cyclone separating cleaning system used on micro-combine harvester of wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 45 - 48. (in Chinese)

[54] MACAULAY J T, LEE J H A. Grain separation on oscillating combine sieves as affected by material entrance conditions[J]. Transactions of the ASAE, 1969, 12(5): 648 - 651.

[55] 王泽群, 肖林桦, 刘广海. 双风道清选装置的研究[J]. 农业机械学报, 1988, 20(4): 41 - 47.

[56] 杜小强, 肖梦华, 胡小钦, 等. 贯流式谷物清选装置气固两相流数值模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 27 - 34.
DU Xiaoqiang, XIAO Menghua, HU Xiaoqin, et al. Numerical simulation and experiment of gas-solid two-phase flow in cross-flow grain cleaning device[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3): 27 - 34. (in Chinese)

[57] 崔俊伟, 韩增德, 张子瑞, 等. 谷物联合收割机清选筛筛面气流分布试验及分析[J]. 农业工程, 2015, 5(2): 1 - 4.
CUI Junwei, HAN Zengde, ZHANG Zirui, et al. Experiments and analysis about airflow distribution over oscillating sieve of grain combine harvester[J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(2): 1 - 4. (in Chinese)

[58] 李方, 李耀明. 切纵流清选室气道气流优化与仿真研究[J]. 农机化研究, 2015, 27(2): 75 - 78.
LI Fang, LI Yaoming. Optimization and simulation research of the airway of tangential-axial combine harvester cleaning room[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 27(2): 75 - 78. (in Chinese)

[59] 汤庆, 吴崇友, 伍德林, 等. 基于 DEM 的谷物联合收割机抖动板性能研究[J]. 江苏农业科学, 2017(1): 208 - 210.

[60] WAN X Y, LIAO Q X, XU Y, et al. Design and evaluation of cyclone separation cleaning devices using a conical sieve for rape combine harvesters[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2018, 34(4): 677 - 686.

[61] 万星宇, 舒彩霞, 徐阳, 等. 油菜联合收获机分离清选差速圆筒筛设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14):

27 – 35.
[62] 李心平, 孟亚娟, 张家亮, 等. 辊搓圆筒筛式谷子清选装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 92 – 102, 136.
LI Xinping, MENG Yajuan, ZHANG Jialiang, et al. Design and test of cleaning device for roller rubbing cylinder sieve of millet[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 92 – 102, 136. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20181011&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.011. (in Chinese)
[63] KENNEY K L, WRIGHT C T, BRYDEN K M. Virtual engineering approach to developing selective harvest technologies[C]// 2005 ASAE Annual International Meeting, Florida, 2005.
[64] UEKA Y, MATSUI M, INOUE E, et al. Turbulent flow characteristics of the cleaning wind in combine harvester[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2012, 5(3): 102 – 106.
[65] 唐忠, 李耀明, 李洪昌, 等. 联合收获机风筛式清选装置清选室内涡流试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 62 – 66.
TANG Zhong, LI Yaoming, LI Hongchang, et al. Analysis on the eddy current of the air-and-screen cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 62 – 66. (in Chinese)
[66] 李洋, 徐立章, 周莹, 等. 脱出物喂入量对多风道清选装置内部气流场的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 56 – 63.
LI Yang, XU Lizhang, ZHOU Ying, et al. Effect of extractions feed-quantity on airflow field in multi-ducts cleaning device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 56 – 63. (in Chinese)
[67] PONPESH P O, GILES D K. Turbulent gas-particle flow modeling for the mitigation of dust emission from nut harvesters[C]// 2009 Reno, Nevada, 2009.
[68] 马晓霞, 李耀明, 徐立章. 联合收割机风筛式清选装置中气流场的仿真研究[J]. 农机化研究, 2007, 29(1): 81 – 82.
MA Xiaoxia, LI Yaoming, XU Lizhang. Simulation research of airflow field in air-and-screen cleaning device for combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(1): 81 – 82. (in Chinese)
[69] 李银海, 丁启朔, 罗海兵, 等. 微型联合收割机气流式清选装置的仿真研究[J]. 农机化研究, 2009, 31(1): 85 – 87, 93.
LI Yinhai, DING Qishuo, LUO Haibing, et al. Simulation on pneumatic cleaning mechanism for mini-combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(1): 85 – 87, 93. (in Chinese)
[70] 刘正怀, 郑一平, 王志明, 等. 微型稻麦联合收获机气流式清选装置研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 102 – 108.
LIU Zhenghuai, ZHENG Yiping, WANG Zhiming, et al. Design on air-flowing cleaning unit of micro rice-wheat combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 102 – 108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150716&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.016. (in Chinese)
[71] LI Yang, XU Lizhang, ZHOU Ying, et al. Effects of throughput and operating parameters on cleaning performance in air-and-screen cleaning unit: a computational and experimental study[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 152: 141 – 148.
[72] 夏利利. 风筛式清选装置中气流场的数值模拟及试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2008.
XIA Lili. Numerical simulation and the experimental study of air flow field of air-and-screen cleaning[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008. (in Chinese)
[73] ADEWUMI B A, RAO S B V, KUMAR K N L, et al. Velocity and trajectory profiles of soybean grains in cross flow system[C]//Food Processing Automation Conference Proceedings, Rhode Island, 2008.
[74] 金鑫, 杜新武, 甘帮兴, 等. 小型联合收获机旋风分离系统清选性能试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 99 – 105.
JIN Xin, DU Xinwu, GAN Bangxing, et al. Cleaning performance experiment of cyclone separating system in miniature combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 99 – 105. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160514&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.014. (in Chinese)
[75] LI J, WEBB C, PANDIELLA S S, et al. A numerical simulation of separation of crop seeds by screening-effect of particle bed depth[J]. Food and Bioproducts Processing, 2002, 80(2): 109 – 117.
[76] 马令然, 曹树坤, 钟文镇, 等. 基于 EDEM 的清选装置作业参数仿真研究[J]. 农业技术与装备, 2017, 331(7): 80 – 83.
MA Lingran, CAO Shukun, ZHONG Wenzhen, et al. Simulation research on operation parameters of cleaning device based on EDEM[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2017, 331(7): 80 – 83. (in Chinese)
[77] 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. Screening performance research and optimition of the plot combine harvester based on EDEM[D]. Chengdu: Xihua University, 2016. (in Chinese)
[78] 李耀明, 赵湛, 陈进, 等. 风筛式清选装置上物料的非线性运动规律[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 142 – 147.
LI Yaoming, ZHAO Zhan, CHEN Jin, et al. Nonlinear motion law of material on air-and-screen cleaning mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 142 – 147. (in Chinese)
[79] 李耀明, 徐立章. 基于 ADAMS 的风筛式清选装置仿真与试验研究[C]//中国农业机械学会学术年会, 2006.
[80] 李耀明, 赵湛, 张文斌, 等. 基于 Mean shift 的筛面物料颗粒目标运动轨迹跟踪[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 119 – 122.

LI Yaoming, ZHAO Zhan, ZHANG Wenbin, et al. Trajectory tracking of particle material motion on sieve surface based on Mean shift algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5):119 - 122. (in Chinese)

[81] 沈有柏, 李耀明, 赵湛, 等. 颗粒物料在三自由度振动筛面上的运动仿真[J]. 农机化研究, 2010, 32(2):21 - 23.
SHEN Youbai, LI Yaoming, ZHAO Zhan, et al. Simulation of the motion of grain on 3-DOF screen surface[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2010, 32(2):21 - 23. (in Chinese)

[82] 杨晓彬, 李耀明, 徐立章, 等. 颗粒物料在三维振动筛中透筛信息仿真[J]. 农机化研究, 2010, 32(2):140 - 142.
YANG Xiaobin, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. The simulation for screening information of the materiel in the three-dimension vibratory screen[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2010,32(2):140 - 142. (in Chinese)

[83] 张文斌, 李耀明, 徐立章, 等. 应用高速摄像技术研究清选筛面上物料的运动[J]. 农机化研究, 2008, 30(5):21 - 24.
ZHANG Wenbin, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Study the motion law of material on air-and-screen by high-speed video camera[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2008,30(5):21 - 24. (in Chinese)

[84] 李耀明, 王智华, 徐立章, 等. 油菜脱出物振动筛分运动分析及试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9):111 - 114.
LI Yaoming, WANG Zhihua, XU Lizhang, et al. Motion analysis and experimental research of rape extractions on vibration sieve[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9):111 - 114. (in Chinese)

[85] 马征, 李耀明, 徐立章. 农业工程领域颗粒运动研究综述[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(2):22 - 29.
MA Zheng, LI Yaoming, XU Lizhang. Summarize of particle movements research in agricultural engineering realm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2):22 - 29. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20130205&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.005. (in Chinese)

[86] CHU K W, WANG B, XU D L, et al. CFD - DEM simulation of the gas-solid flow in a cyclone separator[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(5):834 - 847.

[87] 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 等. 风筛式清选装置振动筛上物料运动 CFD - DEM 数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(2):79 - 84.
LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation of material motion on vibrating screen of air-and-screen cleaning device based on CFD - DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2):79 - 84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20120217&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.017. (in Chinese)

[88] LI H, LI Y, GAO F, et al. CFD - DEM simulation of material motion in air-and-screen cleaning device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012,88:111 - 119.

[89] 蒋恩臣, 孙占峰, 潘志洋, 等. 基于 CFD - DEM 的收获机分离室内谷物运动模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4):117 - 122.
JIANG Enchen, SUN Zhanfeng, PAN Zhiyang, et al. Numerical simulation based on CFD - DEM and experiment of grain moving laws in inertia separation chamber[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4):117 - 122. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140418&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.018. (in Chinese)

[90] 王孙. 基于 CFD - DEM 耦合的小区收割机气流清选装置的设计研究[D]. 成都: 西华大学, 2015.
WANG Sun. Research on airflow cleaning device used on plot wheat combine harvester[D]. Chengdu: Xihua University, 2015. (in Chinese)

[91] 路修强. 基于 CFD - DEM 耦合小麦收获机清选装置仿真分析与优化[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
LU Xiuqiang. Simulation analysis and optimization of wheat harvester cleaning device based on CFD - DEM coupling[D]. Taian: Shandong Agricultural University,2017. (in Chinese)

[92] 马继卿. 贯流风筛清选玉米颗粒透筛模型的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
MA Jiqing. Study on the model of corn grain traversing the holes of the screen in air-and-screen cleaning device[D]. Harbin: Northeast Agricultural University,2015. (in Chinese)

[93] 徐娇娇. 联合收割机夹带损失监测试验方法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.
XU Jiaojiao. Research on monitoring and testing method for the belt loss of combine harvester[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2010. (in Chinese)

[94] MOSTOFI M R. Field evaluation of grain loss monitoring on combine JD 955[J]. Advance in Environmental Biology, 2010, 4(2): 162 - 167.

[95] 介战. 我国谷物随机损失率测试展望[J]. 农机化研究, 2009, 31(7):5 - 9.
JIE Zhan. Prospect of test method of grain random loss rate in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(7):5 - 9. (in Chinese)

[96] 介战, 刘红俊, 侯凤云. 中国精准农业联合收割机研究现状与前景展望[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2):179 - 182.
JIE Zhan, LIU Hongjun, HOU Fengyun. Research advances and prospects of combine on precision agriculture in China[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2):179 - 182. (in Chinese)

[97] 祁广云, 王熙. 谷粒损失监视仪的研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 1996,8(4):67 - 72.
QI Guangyun, WANG Xi. Study on the monitor for grain loss[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University,1996,8(4):67 - 72. (in Chinese)

[98] 王新忠, 张三柱. 联合收割机粮食损失传感器谷粒撞击动力学分析[J]. 农机化研究, 1997,19(2):56 - 59.
[99] STRELIOFF W P, ELLIOTT W S, JOHNSON D. Grain loss monitor: US 4036065 A[P]. 1977 - 07 - 19.
[100] YILMAZ D, SAGIROGLU H C. Development of measurement system for grain loss of some chickpea varieties[J]. Measurement, 2015, 66:73 - 79.
[101] 周利明, 张小超, 刘阳春, 等. 联合收获机谷物损失测量 PVDF 阵列传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6):167 - 171.
ZHOU Liming, ZHANG Xiaochao, LIU Yangchun, et al. Design of PVDF sensor array for grain loss measuring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6):167 - 171. (in Chinese)
[102] 王卓, 车东, 白晓平, 等. 玉米联合收获机清选损失监测装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 107 - 115.
WANG Zhuo, CHE Dong, BAI Xiaoping, et al. Improvement and experiment of cleaning loss rate monitoring device for corn combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12):107 - 115. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20181212&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.012. (in Chinese)
[103] ZHAO Z, LI Y, CHEN J, et al. Grain separation loss monitoring system in combine harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 76(2):183 - 188.
[104] LIANG Z, LI Y, XU L, et al. Sensor for monitoring rice grain sieve losses in combine harvesters[J]. Biosystems Engineering, 2016, 147:51 - 66.
[105] ZHAO Z, LI Y, LIANG Z, et al. Optimum design of grain impact sensor utilising polyvinylidene fluoride films and a floating raft damping structure[J]. Biosystems Engineering, 2012, 112(3):227 - 235.
[106] LIANG Z, LI Y, ZHAO Z, et al. Structure optimization of a grain impact piezoelectric sensor and its application for monitoring separation losses on tangential-axial combine harvesters[J]. Sensors, 2015, 15(1):1496 - 1517.
[107] LIANG Z, LI Y, XU L. Grain sieve loss fuzzy control system in rice combine harvesters[J]. Applied Sciences, 2019, 9(1): 114 - 126.
[108] XU L, WEI C, LIANG Z, et al. Development of rapeseed cleaning loss monitoring system and experiments in a combine harvester[J]. Biosystems Engineering, 2019, 178:118 - 130.
[109] 梁振伟. 多风道清选装置设计方法及清选损失监测与控制技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
LIANG Zhenwei. Study on designing method of multi-duct air-and-screen cleaning unit and grain sieve loss monitoring and controlling technology[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2018. (in Chinese)
[110] 李菊. 用于谷物清选的三维并联振动筛的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
LI Ju. Study on three-dimensional parallel vibrating screen for grain cleaning[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013. (in Chinese)
[111] CRAESSAERTS G, BAERDEMAEKER J D, MISSOTTEN B, et al. Fuzzy control of the cleaning process on a combine harvester[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(2):103 - 111.
[112] CRAESSAERTS G, SAEYS W, MISSOTTEN B, et al. Identification of the cleaning process on combine harvesters, Part Ⅱ: a fuzzy model for prediction of the sieve losses[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(2):97 - 102.
[113] 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. The research on intelligent control system of the combine driven by electricity[D]. Yangling: Northwest A&F University,2015. (in Chinese)
[114] 徐立章, 李耀明, 梁振伟, 等. 一种联合收获机清选筛筛片开度的调节装置及调节方法: 201310691182.7[P]. 2013 - 12 - 16.
[115] 徐立章,李耀明,梁振伟. 一种联合收获机自适应清选控制装置及其自适应清选方法: 201510095728.1[P]. 2015 - 07 - 01.
[116] 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 monitoring and control system of threshing and clearing for maize combine harvester[D]. Jinan: Jinan University, 2017. (in Chinese)
[117] 王智华. 油菜联合收割机风筛式清选装置清选性能的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2006.
WANG Zhihua. Study on cleaning performance of air-and-screen cleaning device for rape combine harvester[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2006. (in Chinese)
[118] 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 等. 基于神经网络的风筛式清选装置研究[J]. 农业机械学报, 2011,42(增刊):65 - 68.
LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Air-and-screen cleaning device based on neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(Supp.):65 - 68. (in Chinese)