doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.001

谷物联合收获机筛分装置研究现状与发展分析

王立军　宋良来　冯　鑫　王后升　李懿航
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 筛分是谷物联合收获作业的关键工序,筛分装置的作业质量直接影响联合收获机的作业性能。现有筛分装置性能可基本满足谷物收获作业要求,但鉴于农业物料的多样性、作业环境的多变且不可控性以及谷物联合收获机的高速作业性,在进行筛分时由于物料喂入量增大和物料含水率的升高,从而产生物料堵塞筛孔、潮湿物料粘附筛体、物料流动性差、筛分效率低等问题。本文以筛体结构和筛体驱动机构为切入点,概述谷物筛分装置的研究现状和研究方法,从不同领域筛分技术的借鉴与互补以及筛分装置高效化、智能化、信息化的发展角度出发,指出谷物筛分装置技术的发展趋势,为我国谷物筛分技术研究和筛分装置的创新设计提供参考。

关键词: 谷物联合收获机; 筛分装置; 筛体结构; 筛体驱动机构; 综述
中图分类号: S225.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)06-0001-17　　**OSID**:

Research Status and Development Analysis of Screening Devices of Grain Combine Harvester

WANG Lijun　SONG Lianglai　FENG Xin　WANG Housheng　LI Yihang
(*College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: Screening is one of the critical processes of grain harvesting. The performance of the combine harvester is directly affected by the operating quality of the screening device. The performance of the screening devices can meet the basic requirements of grain harvesting. However, the development of screening technology was affected by some factors, for example, the diversity of agricultural materials, the complexity of the operating environment, and the requirements for agricultural machinery of having the capability of high-speed operation, which resulted in the increase of the throughput and the irregular change of the moisture content. And the difficulty of high-quality-efficient screening would be increased. Screen structure and its driving mechanism were the critical parts of the screening device. The motion of particles on the screen, such as slipping, being thrown upwards, static, and so on, was affected by the shape of the screen, the configuration of the screen hole, the screen material, and other factors. And the performance of the screening device would be affected. The driving mechanism of the screen could achieve the multi-dimensional motion of the screen. The reasonable motion of the screen could accomplish the rapid dispersion of the materials on the screen for penetrating the screen holes efficiently. And the screening efficiency of the device could be improved. The screening technology's key idea was to solve the contradiction among the screening efficiency, loss percentage of grains, and the impurity percentage of grains. In other words, the grains should penetrate the screen holes efficiently, and the materials other than grains should not penetrate the screen holes but discharge from the device. The purpose of screening was to recover of the full-value grains to ensure the economic value of the grains. These problems were considered, such as particles blocking screen holes, low screening efficiency of devices in a high-throughput, poor fluidity of particles, and wet particles adhering to the screen surface. The research status of screening devices applying to grain was investigated based on the screen's structure and its driving mechanism. The reference and supplement of grain screening technology, and the efficient and intelligent development of screening devices were discussed. A reference was provided for the research of the grain screening technology and the design of the innovative device in China.

Key words: grain combine harvester; screening device; structure of sieve; mechanism of sieve driven; literuture review

收稿日期: 2021-03-13　修回日期: 2021-04-01
基金项目: 国家自然科学基金项目(52075091)
作者简介: 王立军(1978—),女,教授,博士生导师,主要从事收获机械研究,E-mail: wljszf@163.com

0 引言

粮食是实现经济可持续发展的重要物质基础,优质高效的机械化收获是提高谷物经济价值的有效手段。筛分装置是谷物机械化收获的重要部件之一[1],筛分装置通过一定方式的筛体运动实现谷物与杂余的分离,其性能直接影响收获后籽粒的损失率和清洁率[2]。2020 年我国谷物(稻谷、小麦、玉米等)平均单位面积产量约为 6 296 kg/hm^2。通过农场调研发现,在玉米常规含水率(22% ~23%)和喂入量(机具前进速度 1.2 ~1.5 m/s)条件下,现有的先进联合收获机收获后籽粒损失率为 0.25% ~1.20%。若以玉米单位面积产量 6 317 kg/hm^{2}来计算,籽粒损失率每降低 0.1 个百分点,可提高玉米籽粒产量约 6.317 kg/hm^2,以全年玉米种植面积为 4.126×10^7 hm^{2}计算,每年可减少粮食损失 26 万 t。因此提高筛分装置性能对保障粮食安全、减少粮食损失具有重要意义。

筛体及其驱动机构是筛分装置的核心部件,受筛体外形、筛孔配置、筛体材料等因素影响,物料会产生滑移、抛起、静止等复杂运动,进而影响颗粒的透筛性[3-5]。筛体驱动机构驱动筛面进行多维运动,适宜的筛面运动可实现物料的快速分散、分层、透筛,从而提高装置筛分效率[6]。筛分技术主要解决筛分效率、籽粒损失率、清洁率之间的矛盾[7],即研究籽粒快速透筛、杂余不透筛并顺利从装置中排出、对籽粒进行全价值回收以保证其经济效益等问题。

由于农作物单产的提高以及筛分环境的多变、不可控性,筛分时会产生潮湿物料粘附筛面、物料大喂入量下筛分效率低、分选效果差等问题[8-12]。因此大喂入量和高含水率的物料分离已成为制约筛分技术发展的主要因素[13-15],同时也是筛分技术亟需突破的难点问题。本研究以筛体结构和筛体驱动机构为切入点,概括并分析谷物筛分装置的研究现状,从对不同领域筛分技术的融合与互补以及筛分技术的高效化、智能化、信息化的发展角度,指出谷物筛分装置的发展趋势,为我国谷物筛分技术研究和筛分装置的创新设计提供参考。

1 谷物筛分装置研究现状

1.1 筛体

筛体是筛分装置的核心部件之一,在谷物筛分中筛体通常与风机配合使用[16],对混合物料进行抛掷、分散、分层[17-18],在此过程中籽粒透筛,杂余不透筛从装置尾部排出。在筛分过程中物料直接与筛体接触,其中筛孔的类型、筛体的形状及其材料会影响物料的运动,进而影响筛分效果。农业物料具有种类多、含水率不可控等特点,在一定程度上增加了农业物料筛分的难度,为满足高质、高效谷物收获技术要求,许多专家从筛孔形状及其排布、筛片形状、筛体材料及辅助部件等方面对筛体进行了创新设计研究。

1.1.1 筛片和筛孔

谷物筛分中常规的筛片类型和筛孔形状与排布如表 1 所示[19]。

为降低潮湿物料与筛面间粘附作用、减少大喂入量下物料的堵塞和堆积、提高装置对大喂入量物料的筛分性能,许多专家学者对筛孔形状与排列方式进行了创新设计与研究,典型成果如表 2 所示。

表 1 谷物筛分常规筛片类型和筛孔形状与排布

Tab.1 Common screens types, and shape of screen holes and their align in grain screening

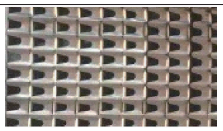
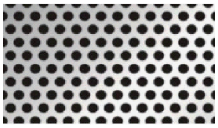
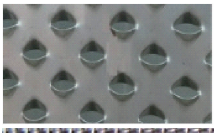
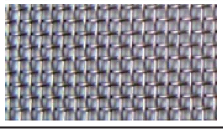
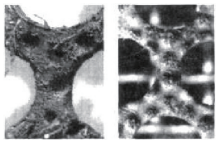
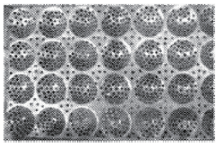
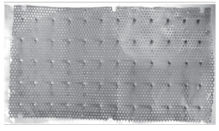
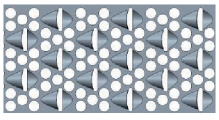
类型	结构示意图	特点	主要适用谷物
鱼鳞筛		由冲压的鱼鳞形筛片组成,通过调整鱼鳞片的开度实现不同物料的筛分,可引导气流吹走杂余,排出残穗、碎秸秆等,筛面不易堵塞,生产率高、通用性广,一般作为上筛粗选	玉米、小麦、大麦、水稻、大豆
冲孔筛		镀锌光板冲孔而成,孔形状为圆形或长方形,筛孔不易变形,分选性能好,但易被残穗、碎秸秆插入堵塞,生产率低,一般作为下筛精选	玉米(Φ 15)、水稻(Φ 8)、小麦(Φ 6)
鱼眼筛		鱼眼筛筛孔位于筛面凸起的垂直面上,用于单向清选,向后推送物料能力强,杂余不易堵塞筛孔,但效率低,不适宜大负荷的清选工作	玉米、水稻、大豆
编织筛		由镀锌铁丝编织成,结构简单,有效筛分面积大,筛漏能力强,生产率高,但筛分物料不精准,筛网易挂碎秸草,筛孔尺寸小时易堵塞,长时间工作筛体易变形,常用于粗选	玉米、水稻、小麦

表 2　新型筛孔形状与排列方式

Tab. 2　Shape and align of new screen holes

筛孔形状与排列方式	结构示意图	特点与性能	适用谷物
仿生凸包、凹坑筛		基于仿生非光滑表面可降低物料接触阻力的思想，设计了仿生凸包和凹坑型筛面，直径为 2 mm 的半球形凸包和凹坑被等距布置于筛上，新型仿生筛面可降低物料粘附，且凸包型筛面效果更为明显[20]	油菜
凹坑型筛		基于物料三维透筛思想设计的一种浅坑型筛面，即在等距分布相同筛孔的筛板上，阵列出半球冠形或椭球形浅凹坑，增大了筛体的有效筛分面积，试验证明浅坑型筛面相比于平面筛筛分效率提高了 15.7%[21]	水稻
凸柱筛		由等距安装在筛面上一系列凸柱（圆柱式、圆台式、圆锥式）构成，凸柱对谷物起到了防止堆积及疏松的作用，特别是对振动筛入口处的谷物，当凸柱率为 2.5% 时可提高筛体筛分效率 8%[22]	水稻
组合孔筛		贝壳-圆孔组合孔筛是由等距圆孔分布于贝壳孔周围构成，组合孔筛结合了贝壳筛对物料的分散性和圆孔筛对籽粒的透筛性，实现了筛分时籽粒的快速分散，提高了籽粒的透筛概率，试验证明了组合孔筛具有处理大喂入量玉米脱出物的筛分能力[23]	玉米

基于目标颗粒快速透筛和筛面防粘附的思想，仿生筛、浅坑筛和组合孔筛等被提出，现阶段通常采用筛面上同径筛孔等距排布的方式，而物料在装置前端喂入的形式，导致连续筛分过程中，沿筛体纵向物料层产生差异，为进一步提高筛分的精准性，可以创新筛孔排列方式，即沿筛体纵向非同径筛孔差距排列，解决筛上不同区域待筛分物料的差异，提高籽粒的透筛效率，从而提高装置的筛分性能。

1.1.2　筛体形状

现有振动筛多为平面一体式结构，一定程度上限制了颗粒透筛，为提高筛分装置的性能，专家对筛体形状进行了创新研究，其特点与性能如表 3 所示。

在一定空间内非平面筛体结构可增大物料与筛面的接触面积，提高颗粒的透筛概率；分段式筛体的研究证明了分段式结构可满足筛体不同区域的筛分要求；现阶段仿生技术已被广泛应用于农业机械研究中[30-32]，为振动筛体的设计提供了新思路，例如通过仿生技术模仿鸟类、昆虫、爬行动物等表皮特征。可尝试将这 3 种设计思想（非平面、分段式、仿生技术）融合并应用于振动筛体形状设计中，例如可借鉴蚯蚓的蠕动特征，通过多筛段的不同运动，使整体筛面表现出蚯蚓的运动特征，实现筛上物料的快速推移，进而提高装置的筛分效率[33]。

1.1.3　多层筛体配置

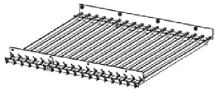
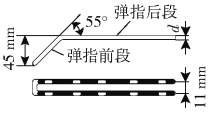
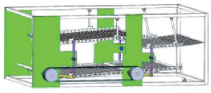
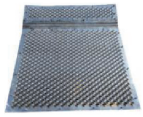
筛分装置通常配置多层筛体，实现不同精度的筛分。刘鹏等[34]以常规鱼鳞筛、加长鱼鳞筛、错位鱼眼筛、线性鱼眼筛和贝壳筛为上筛，网筛、圆孔筛和六棱孔筛为下筛，鱼鳞尾筛和栅格尾筛为尾筛，应用模糊综合评价法分析了不同组合的清选筛对大豆的清选损失率和含杂率的影响规律。梁苏宁等[35]针对谷子筛分时鱼鳞筛堵塞问题，将不同孔径编织筛布置为上、下筛体，实现谷子混合物由粗至精的筛分，大幅度减少了谷子的筛分损失。张敏等[36]探究了鱼鳞上筛-圆孔下筛风选装置工作参数对籽粒损失率和含杂率的影响，利用多因素试验获得了此装置较优的工作参数组合。筛分时上筛中物料由抖动板喂入，而下筛的物料可间接视为由上筛喂入，因此多层筛体配置方式会使不同筛层的筛分条件产生差异，从而导致不同筛层混合物料的比例、入筛时初始条件、透筛要求的不同，因此为实现更精准的筛分，多层筛体配置仍有一定的设计空间。通过大型农场（黑龙江省八五二农场、赵光农场）玉米收获调研发现，在常规收获机前进速度下，鉴于单层筛体可以满足筛分要求，农户通常将下筛拆除，以减小收获机的功率消耗，节省收获成本，并通过调节清选装置工作参数，如振动频率、气流速度等保证一个良好清选状态，因此在多层筛体的研究中，也需从实际应用的角度出发，结合功率消耗、材料损耗等综合考量筛体性能。

1.1.4　辅助部件

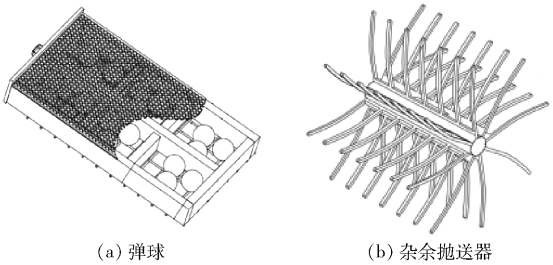
在谷物联合收获机上增加辅助分离部件可以提高装置对物料的分离能力，传统部件主要以回转式横向拌动式和茎秆挑松式拨指为主，通常布置于装置上方对杂余进行拨动，主要为防止物料喂入不均匀产生堆积。基于此为降低筛上物料粘附、提高筛分时物料的分散程度，专家对辅助部件进行了创新

表 3 非平面一体筛

Tab. 3 Non-planar-integrated screen

筛体形状类型	结构示意图	特点与性能	适用谷物
百叶窗筛		百叶窗筛可提高筛体的导风能力,配置时去除了清选装置内尾筛,并将百叶窗筛一直延伸至装置尾部,对籽粒含量较高的再生水稻脱出物具有较高的清选能力,通过与鱼鳞筛筛分性能对比试验得出,百叶窗筛可降低筛分后籽粒的损失率[24]	水稻
波浪筛		一种非平面横向波浪式筛体,提高了筛分时物料与筛面的接触面积,试验得出波浪筛相比于平面筛的筛分效率提高了 17.3%[21]	水稻
搭接式弹指振动筛		搭接式弹指振动筛由横向间隙的若干个弹指纵向等距排列组成,各排弹指使筛面形成逐级搭接分段式结构,通过与编织筛、冲孔筛、栅条筛进行性能对比,得出弹指筛可减少联合收获时花生物料的堵塞,降低大喂入量下籽粒含杂率和损失率[25]	花生
直角跳跃板圆筒筛		带有直角跳跃板的圆筒筛被应用于改进后的三圆筒筛清选装置,跳跃板的设计增大了大圆筒筛与脱出物的接触面积,将线接触变为面接触,增大了圆筒筛将脱出物向上抛掷角度,增加了脱出物在垂直及水平方向上的位移,可改善分层效果,提高清选性能[26]	燕麦
半圆筒筛		玉米螺旋式清选装置由倾斜式半圆筒筛片与螺旋输送器组成,清选时装置运行稳定、噪声小,装置的筛分效率高,但螺旋输送器与固定的半圆筒筛片存在间隙,在筛分时会导致玉米籽粒的破碎,此装置结构有待进一步优化[27]	玉米
分段筛		分段式圆孔振动筛可提升筛体尾部气流速度,前、后筛段不同高度配置可以实现物料的二次分离,对比试验证明分段式振动筛清选装置相比于双层平面往复振动筛清选装置籽粒清洁率提高了 1.26 个百分点,损失率降低了 0.8 个百分点[28]	玉米
阶梯筛		带有阶梯缓冲带的振动筛,在筛体中后部设置阶梯缓冲带,实现籽粒的“暂时”滞留,杂余顺利通过,降低了杂余对籽粒的夹带作用,相比于平面贝壳筛,阶梯式贝壳筛作业后籽粒损失率降低至 2.12%,清洁率提高到 99.16%[29]	玉米

研究。常荣等[37]针对荞麦筛分时普遍出现筛孔堵塞的问题,设计了一种弹球清选筛,即在筛面下方安置内部含有弹球的带筛孔方盒,如图 1a 所示,筛分时弹球产生弹跳敲击筛面,从而防止筛孔堵塞,通过试验证明了弹球在荞麦分级过程中清筛效果显著。王立军等[38]为提高筛面利用率设计了一种杂余抛送器,如图 1b 所示,其由若干个曲线拨指间隙排列组成,通过回转运动可实现清选筛上部空间籽粒与杂余在竖直方向上分层、水平方向上分散,试验证明了此辅助部件的使用可提高筛分装置对大喂入量玉



(a) 弹球 (b) 杂余抛送器

图 1 辅助部件

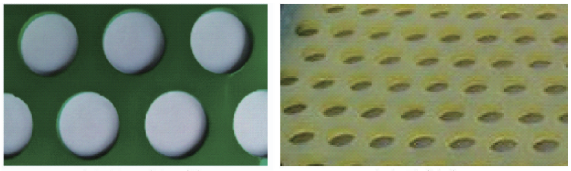
Fig. 1 Screening device with auxiliary unit

米脱出物的筛分能力。混合物料通常在筛体前端喂入,使筛体前端承担着较大工作量,尤其当物料喂入量增加时,由于筛体前端处理物料的能力不足,在连续筛分中可能会产生物料的堆积,且筛孔堵塞已成为谷物筛分中常见问题,辅助筛分装置的设计为解决此问题提供了参考,但辅助装置通常较为复杂,为满足实际生产需求,其结构、可靠性和装配问题仍需系统化研究。

1.1.5 筛体材料

筛分时物料直接与筛面接触,筛面材料影响颗粒与筛面的接触参数,进而影响筛上颗粒的运动,因此许多专家对筛面材料进行了研究。程超等[39]、穆培良[40]设计了聚四氟乙烯和聚脲弹性振动筛,通过试验证明了聚四氟乙烯涂层筛面(如图 2a 所示),可降低水稻脱出物的粘附和堵塞,且具有一定的耐久性,而聚脲弹性筛可降低筛分后籽粒的损失率和含杂率。王立军等[41]根据聚氨酯材料具有弹性模量大、强度高、耐磨性强等特点,设计出聚氨酯橡胶筛,如图 2b 所示,通过与金属筛的性能对比,证明了

此筛体对筛上玉米脱出物具有较高的分散、分层能力。物料在振动筛的运动激励下与筛面发生接触碰撞行为，且该行为贯穿于整个筛分过程中[42]，籽粒和杂余的物理特性差异和筛体材料会影响物料与筛体碰撞后的运动，筛体材料的研究为籽粒和杂余产生合理的差异运动提供了一种可行的方法。



(a) 聚四氟乙烯　　(b) 聚氨酯

图 2　筛体材料

Fig. 2　Material of screens

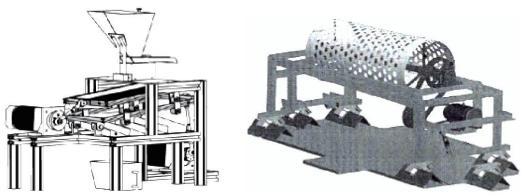
1.2　筛体驱动机构

利用筛体驱动机构使筛体产生不同的筛分动作，从而实现物料的运移、分散、分层和透筛。筛体常规的运动为平面往复式，可实现物料的基本分离，但当物料量增多且连续筛分时会出现筛上物料堆积的现象，大幅降低了振动筛的筛分效率。为推进筛分技术发展，谷物筛分装置应具备对大喂入量物料的处理能力，许多专家学者从筛体多维运动的角度出发，对筛体驱动机构进行了创新研究。

典型的谷物筛分机构由曲柄-摇杆构成，可使筛体沿振动方向往复运动，通常定义此筛体的运动为二维运动，即沿筛体水平和竖直方向的运动。现阶段一些筛体驱动机构可实现其多维运动，如筛体可实现沿纵向、横向和竖直方向转动和移动的不同组合的运动形式，因此将筛体运动分为二维和多维两种形式，分别对其驱动机构进行概述。

1.2.1　二维运动筛体驱动机构

筛体的常规运动为平面往复式运动，即筛体水平和竖直方向的移动，鲁云松等[43]基于曲柄-摇杆和曲柄-滑块组合机构设计了二移动振动筛驱动机构，如图 3a 所示，通过筛分试验探究了曲柄转速、杆件长度对清选效果的影响规律，通过多因素试验优化获得了该机构较优的参数组合。



(a) 曲柄-摇杆-滑块二自由度振动筛驱动机构　　(b) 往复回转式滚筒筛驱动机构

图 3　二维筛体驱动机构

Fig. 3　Driving mechanism of two-dimensional screen

谷物筛分目的是实现籽粒透筛而杂余排出，为提高筛体对物料的运移能力，王成军等[44]对传统回转式滚筒筛布置并联机构，如图 3b 所示，实现滚筒筛自身转动的同时产生平面往复运动，通过仿真证明了该机构可实现筛体转动和移动，验证了机构设计的合理性，并通过性能试验得出该机构可提高物料的筛分效率。

1.2.2　多维运动筛体驱动机构

为提高筛分时物料的分散、分层速率，许多专家设计出多维运动振动筛驱动机构，基于筛体转动和移动不同的组合形式对振动筛驱动机构进行总结，如表 4 所示。

多维振动筛驱动机构存在着机构复杂、稳定性不高等问题，机构的实用性和可靠性还应进一步完善，而谷物收获中振动筛通常与风机配合使用，在研究中还需考虑到多维运动筛面对筛上气流扰动的影响，并且在驱动机构设计中应考虑到筛面运动的可调节性和地形的自适应性，以使筛分装置具备对坡地谷物收获的功能。

1.3　联合收获机上典型的清选系统

谷物筛分装置主要用于水稻、玉米、小麦等收获机械中，谷物筛分主要以振动筛为主，通常配置风机以提高筛分性能，随着筛分技术的发展，一些已成型的清选系统被广泛应用于谷物联合收获机中，这些清选系统及其特点见表 5。

在清选能力方面，国内以增大清选装置中振动筛的清选面积，来达到大喂入量筛分的目的，国外在此基础上使用多层抖动板和多层振动筛进行筛分，进而实现大喂入量下的清选；在装置可靠性方面，由于国产机器大多为仿制与引进，且在关键部件精密制造方面与国外企业仍有一定差距，可靠性仍有待提高；在智能化应用方面，国外的机器较为先进，主要表现为损失监测、自调平和自动调节等方面，其中约翰迪尔、凯斯等公司可以通过清选损失监测传感器实时地观测谷物清选损失来监测实际作业情况[62]，芬特与科乐收等公司自调平系统可以使联合收获机进行坡度作业时具有良好的清选效果[63]，纽荷兰公司 CR 系列联合收获机配备自动调整系统，可以根据实际作业的需要，实时调节清选装置内风机转速和上、下筛的振动频率[64]。而国内大部分研究仅仅停留在籽粒损失检测方面[65-66]，且处于产业化前期阶段。

2　谷物清选装置研究方法

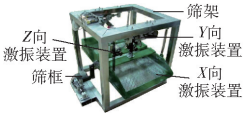
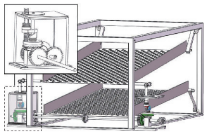
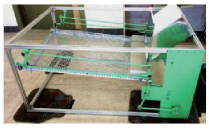
2.1　筛体

2.1.1　基于仿生技术的筛体设计

仿生技术是工程技术与生物科学相结合的交叉学科，在技术上仿照植物或动物的功能解决工程领

表 4 多维运动筛体驱动机构

Tab. 4 Driving mechanism of multi-dimensional sieve

筛体运动形式	机构示意图	特点
2 移动 1 转动		筛体两侧和上下端分别布置激振电机,同时利用筛体和固定筛架间的铰接配合,实现了筛体竖直和水平方向的移动以及自身转动[45]
3 移动(三自由度混联设计方法)		一种基于机构拓扑结构理论全解耦的三自由度混联机构,激振机构可实现筛面的纯三维平移,通过仿真试验得到增加筛面横向移动,可提高筛分时物料的分散度,从而提高振动筛分的筛分效率[46]
3 移动(圆柱凸轮机构)		圆柱凸轮振动筛驱动机构,通过周转偏心推杆与固定圆柱凸轮,实现筛面三维平移,相比于传统四杆机构,圆柱凸轮机构具有较高的稳定性和可靠性,结构紧凑,运行平稳[47]
3 移动 1 转动(方位特征集拓扑结构)		基于方位特征集并联机构拓扑结构设计方法,在筛体四周布置对称支链结构实现了筛体的 3 移动 1 转动,并通过无气流作用下的筛分试验探究了 3 移动 1 转动振动筛的性能[48],刘晓飞等[49]将此机构应用于风筛清选中,得出筛体宽度方向增加微小的激振能显著提高振动筛的清选性能
3 移动 1 转动(拓扑降耦结构)		为减少筛体驱动机构的动力源,基于拓扑降耦设计方法设计了少输入-多输出的 3 平移 1 转动振动筛并联驱动机构,进行了虚拟样机的试制[50]
3 平移 1 转动(曲柄-倾斜滑块机构)		曲柄-倾斜滑块振动筛驱动机构,在筛体后端配置吊杆,在筛体三维移动的同时附加了筛体前端的俯仰转动,通过试验证明了此机构相比于平面往复筛体运动机构,可降低筛分后籽粒损失率和含杂率[51]
3 移动 2 转动		3 移动 2 转动振动筛驱动机构在曲柄-摇杆机构基础上在筛面两侧非对称布置限位杆(单侧限制自由度)、筛面尾部布置吊杆,以实现筛面横向、纵向、竖直移动的同时可沿筛面纵轴和横轴转动,物料筛分试验证明了此机构相比于平面往复筛体运动机构可提高籽粒透筛率 5.75%,高速摄像试验技术对比分析了平面往复、3 移动 1 转动、3 移动 2 转动振动筛筛面上颗粒的分散程度,得出在 3 种运动形式中3 移动 2 转动筛体的筛分效率最高[52-53]

域问题[67-68]。仿生技术的逐渐成熟,使其成为筛分领域筛体设计的一种方法[20]。针对动物表面的减粘降阻特性,例如蜣螂头部、蝼蛄背板、蚯蚓体表、穿山甲鳞片等,可为仿生筛体的创新设计提供参考,为防止潮湿物料粘附筛面、提高物料在筛上的流动性,通常仿生技术基于逆向工程对生物结构进行提取[69],通过一些可提取体表特征的 3D 激光扫描仪或利用 Matlab 软件处理图像(去干扰和噪声)[70],完成样品的体表曲面提取,获得样品体表曲线的点坐标数据,通过 Matlab 软件进行曲线拟合,具体流程如图 4 所示,获得的拟合方程可为筛体设计提供参考。

2.1.2 筛型控制方程

筛上颗粒动力学分析可以建立筛体结构和运动参数与颗粒运动之间的数学模型,从而预测筛上颗粒的运动形式,在筛形设计的研究中可以此建立颗粒运动与筛形间的函数关系,指导筛型设计。例如鉴于物料沿筛体纵向的运动差异,基于筛上颗粒静力学分析,筛型控制方程被提出[71],由此提出了凸面、平面、凹面 3 种筛型的控制方程,如图 5 所示,此方法为筛体的设计提供了参考。

2.2 筛体驱动机构

2.2.1 驱动机构动力学和运动学理论分析

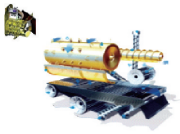
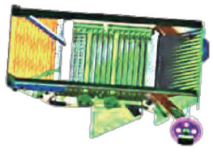
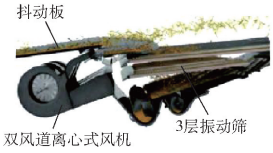
筛体驱动机构控制筛面运动,在驱动机构的研究中通常需先了解筛面运动形式,通过分析驱动机构的动力学模型可明确筛面运动规律,为驱动机构的优化提供基础,同时也为后续气固两相流数值模拟中筛体运动设定提供参考,现有机构的动力学数学模型研究方法如表 6 所示。

2.2.2 驱动机构运动仿真分析

在筛体驱动机构的研究中,通常建立驱动机构动力学模型后,需借助计算机技术探究机构的运动特征,计算机技术具有高效处理能力、更直观的表现能力,机构运动仿真现已成为筛体运动研究的主要

表 5　联合收获机上应用的典型清选系统

Tab. 5　Typical cleaning system applied to combine harvester

谷物收获机型号	清选系统示意图	特点
洋马 AG600 型半喂入式联合收获机[54]		抖动板尾部设置间隔式弹指，利于物料分散，配置双层异向往复鱼鳞筛，可实现谷物的二次筛分，可调节筛孔开度以完成不同谷物的收获
凯斯 4088 型谷物联合收获机[55]		纵向抖动板实现物料连续均匀喂入，双层短齿鱼鳞筛实现谷物多级筛分，导向式尾筛可使杂余顺利排出
约翰迪尔 R40 型联合收获机[56]		上、下筛均采用可调节开口的鱼鳞式筛片，加大分离面积，谷物在清选筛的分布更均匀，可实现谷物的精细筛分，导向式抖动板可提高喂入时物料的流动性
沃得 4LZ 型联合收获机[57]		配置双层鱼鳞筛与阶梯式抖动板，下筛面积增加了 15%，满足大喂入量物料持续输送要求
芬特 IDEAL 联合收获机[58]		配置双层筛，凹形抖动板便于收集脱出物，抖动板喂料口呈扇形利于物料均匀喂入，在 15°的坡度内，自调平系统可实现物料均匀地喂入与筛分
雷沃谷神 RG60 型联合收获机[59]		配置双层阶梯鱼鳞筛，其中分段式上筛长度可调，增加了清选筛的长度，增大了有效清选面积，提高了大喂入量条件下的清选装置的适应性
科乐收 LEXION 系列联合收获机[60]		配置抖动板和 3 层鱼鳞筛，实现大喂入量谷物筛分，在不同工作条件下系统可自动调节筛分参数，以保持良好的筛分效果，自调平系统可实现坡地谷物联合收获
约翰迪尔 C440 型联合收获机[61]		配置多层鱼鳞筛，每层筛体设定不同倾角，可实现大喂入量谷物的精细筛分

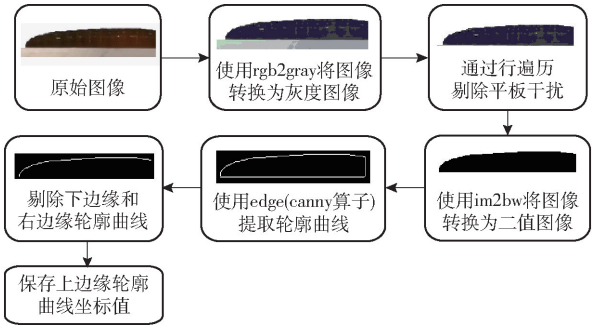


图 4　仿生逆向工程中曲线获取流程图

Fig. 4　Process of obtaining curve in bionic-reverse engineering

方法，常用软件类型及特点如表 7 所示。

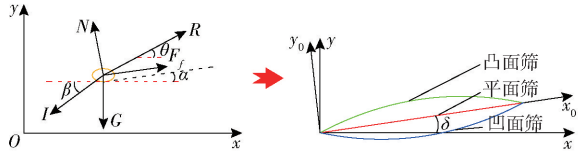


图 5　筛型控制方程

Fig. 5　Equation of controlling shape of screen

2.3　筛分装置性能研究方法

2.3.1　模拟仿真研究

筛分装置的性能需基于一些指标衡量，如：损失率、清洁率、筛分效率等，且筛上颗粒运动特征可反映出筛体设计思想的合理性，如筛体倾角改变实现物料快速推移、空间筛孔结构加强物料沿筛体横向

运动、具有弹性材料筛面提高筛上颗粒分散等,由于颗粒运动的复杂,通常借助计算机模拟筛分过程,处理数据获取相应的指标,进而探究筛分装置的性能,软件类型及特点如表 8 所示。

表 6 驱动机构动力学模型研究方法

Tab. 6 Research method of dynamic model of driving mechanism

方法	特点	应用
Lagrange 法	从能量的角度以系统的动能和势能建立构件间关系,免去了运动学中求解加速度和角加速度的部分,其推导过程比较简便,并且总能得到形式较为简洁的动力学方程,但当构件数目增加时,此方法的运算量很大[72-73]	白志富等[74]应用 Lagrange 法获得了三自由度并联机构在工作空间内的动力学方程,得出了滑块驱动力的显式解,基于此对机构的动态特性进行了分析
Newton-Euler 法	以单个构件作为建模对象,利用牛顿力学的刚体力学导出构件的逆动力学的递推计算公式,而后确定构件的动力学模型,采用笛卡尔坐标描述系统位形,该方法物理意义明确,但计算量较大[75]	沈惠平等[76]基于 Newton-Euler 原理的序单开链法,对含两个 SKC 的空间并联机构进行动力学建模,计算得到该机构主动副的驱动力矩变化曲线,为并联运动振动筛的动力学参数优化提供了理论基础
虚功动力法	基于虚位移原理构建的动力学方程,此方法较简单,模型中冗余信息少,某些情况下,此方法比几何方法更容易得到动力学方程,处理动力学逆问题效率较高[77]	陈修龙等[78]采用虚功原理建立了 5 自由度并联机器人机构的动力学模型,分析了各构件的运动特征,建立了各构件与驱动轴之间的速度映射矩阵和机构的动力学模型
解析法	基于机构的位置方程,通过数学手段建立起待求的运动量(位移、速度、加速度)与机构的运动尺寸这些变量的关系式,通常需借助计算机技术描绘机构整体循环运动过程[79]	王立军等[80]基于曲柄摇杆与平面四杆机构,设计了 2 移动 2 转动振动筛驱动机构,采用解析法对机构运动学进行了分析,利用 Matlab 数值模拟方法获得了筛面的运动特性

表 7 筛体动力学分析软件类型及特点

Tab. 7 Type and characteristics of software for analyzing dynamics of screen

软件名称	特点	应用
ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems)	一款机械系统动力学的分析软件,其求解器采用多刚体系统动力学理论中的拉格朗日方程方法,可以运用该软件非常方便地预测虚拟机械系统的性能、运动范围、碰撞检测等,在农业物料清选中,可用于驱动机构的静力学、运动学和动力学分析[81]	肖迎春等[82]基于籽粒与脱出物在清选筛上的运动差异,设计了清选筛的驱动机构,通过 ADAMS 提取筛面加速度曲线与筛面倾角,并探究了驱动机构的性能
Matlab (matrix&laboratory)	一种将数值分析、矩阵计算、科学数据可视化以及非线性动态系统的建模和仿真等诸多强大功能集成在一个易于使用的视窗环境中的数学软件,在农业筛分领域中,可用于清选筛机构的运动分析以及筛面上谷物的运动轨迹分析[83]	袁世先[84]运用 Matlab 软件中的 Simulink 建立了花生收获机振动筛机构仿真模型,分析图形化求解方法,通过设计并运行仿真模型得到振动筛的运动学变化曲线,量化了振动筛机构周期性运动
RecurDyn (Recursive Dynamic)	一种多体系统动力学仿真软件,适合于求解大规模的多体系统动力学问题。可以建立起系统的机械虚拟数字化样机模型,并对其进行运动学、动力学等虚拟测试验证。在农业机械领域中,可以通过机构仿真获得数据、动画、轨迹等结果,实现创新设计[85]	曾健[86]将建立的振动筛模型导入到 RecurDyn 软件中,将振动筛的主要构件柔性化,并对振动筛进行刚柔耦合动力学仿真,进一步得到筛箱在受到激振力后的振动参数及动应力状况,进而验证了该振动筛结构的稳定性
Creo(Pro/E)	一种整合了 PTC 公司 Pro/Engineer 的参数化技术、CoCreate 的直接建模技术和 ProductView 的三维可视化技术的新型 CAD 设计软件,在农业机械领域,使用 Creo 可对机构进行运动学仿真,为农业机械机构的优化设计提供新的方法[87]	张舰[88]利用 Creo 三维设计软件建立曲柄连杆机构振动筛三维模型,并对振动筛筛面进行三点运动仿真分析,获得了关于筛面位移、速度、加速度等方面的信息,同时对影响筛面运动的振动筛工作参数进行了分析
Isight	Isight 软件可通过一种搭积木的方式快速集成和耦合各种仿真软件,将所有设计流程组织到一个统一、有机和逻辑的框架中,在不用人工干预的情况下不断地调用相应的工程计算软件进行计算,在农机领域,可运用 Isight 软件调用其他动力学分析软件对机械机构进行动力学分析,为机构的优化设计提供新的思路[89]	王立军等[52]运用 Isight 软件的 Design Gateway 的主菜单建立了 Matlab 组件的优化模型,优化命令以运动学方程为基础,设定各个设计变量的取值范围,建立了目标函数与约束函数,并将各个设计变量、目标函数和约束函数联系起来,基于序列二次规划算法的优化参数,对设计的振动筛驱动机构模型进行了优化

表 8　软件类型及特点

Tab. 8　Type and characteristics of software

软件名称	特点	应用
PFC2D/3D (Particle Flow Code 2D/3D)	多用途离散元法建模软件,通过模拟颗粒间的力学关系,可反映任意大小的二维圆盘或三维球体集合体的运行,具备分析颗粒相互作用的程序,农业物料筛分中可模拟筛体对球状颗粒集合体的动态运动的影响[90-91]	汪晓华等[92]为了提高平面圆筛机的筛分性能,基于离散元 PFC3D 方法对茶叶在平面圆筛机上的筛分过程进行数值模拟和分析,探究了平面圆筛机回转半径和速度对筛净率的影响规律
EDEM (Discrete Element Method)	EDEM 可以获取每个颗粒的属性(质量、速度等)及施加在颗粒上的力的信息。它能够将颗粒的各种形状考虑在内,而不是简单地假定所有颗粒都是球形。颗粒工厂技术为生成颗粒集合提供了一种独特、高效的方法,机械零件可分别设定每个组的动力学参数,实现模拟真实筛体运动与结构,从而进行装置性能的研究[93]	刘瑞等[94]为了探究玉米颗粒在直线振动筛面上的运动情况,应用离散元软件 EDEM 模拟玉米圆颗粒筛分过程,探究了不同形状的筛孔、不同下落高度和不同形状颗粒对筛分效果的影响规律
AgriDEM (Agricultural Discrete Element Method)	一种集设计和性能分析评价为一体的新型 CAE 软件,实现了三维 CAD 软件与自主研制的三维离散元法软件、三维计算流体力学(CFD)软件、三维多刚体运动学(MBK)软件的集成,通过改变散粒物料颗粒模型、接触力学模型及参数,能分析不同种类散粒物料与机械部件的接触作用,为农机部件的优化设计提供一种新方法[95]	WANG 等[96]利用 AgriDEM 软件对振动筛进行建模,利用具有多体运动学(MBK)的离散元法的耦合模型模拟了筛上颗粒的流动和透筛情况,探究了各参数对筛体性能的影响规律
CFD-DEM (Fluent and EDEM)	一种气固两相流(CFD-DEM)模拟方法,将流体-颗粒系统假设为相互掺混的两种流体组合,通过 CFD 技术求解气流场,使用 DEM 方法计算颗粒系统运动情况,无论流体还是颗粒均可采用适合自身特点的数值方法进行模拟,模拟涉及到颗粒形状、材料属性、粒径分布等,可更准确地描述筛体对颗粒运动和气流场的影响[97]	XU 等[98]为了预测水稻联合收割机的清选性能,采用 CFD-DEM 耦合的方法模拟水稻脱出物的筛分过程,提取脱出物颗粒的质心速度和分散度,得到了其与清选装置性能的数学模型,并通过台架试验验证了模型的准确性

2.3.2　高速摄像技术

试验中通常采用高速摄像技术,基于筛上区域可视化的筛分装置,客观地对颗粒群真实的运动进行追踪[99-100],如图 6 所示。

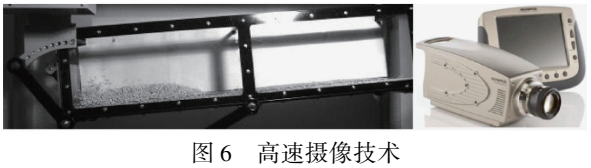


图 6　高速摄像技术

Fig. 6　High-speed camera technology

通过分析颗粒位移、速度、轨迹探究颗粒群的运动特性[101],验证筛体设计的合理性和适用性。此技术局限于颗粒平面运动的提取,针对颗粒三维空间运动的研究,此技术还有待进一步开发与优化。

2.3.3　筛分装置性能监测与控制研究方法

复杂多变的收获环境会影响筛分装置性能,在联合收获时需通过监测系统实时监测筛分装置性能[102],并通过控制系统对筛分装置进行实时调节,以保证在变化的筛分环境下,使筛分装置性能保持合理的范围。降低筛分时籽粒损失是保障收获时籽粒经济价值的重要措施,其始终为农户关注重点,筛分装置性能监测和控制更注重于籽粒损失方面,许多专家学者对此进行了研究,主要成果见表 9。

联合收获机通常具备对多种谷物(玉米、小麦、水稻等)的收获能力,为适应联合收获机此功能,监测系统也需具备多种谷物损失的监测能力,且筛分时监测部件通常配置于装置尾部,由于出口物料运动随机,致使物料接触监测元件时姿态复杂,影响监测精度,并且物料含水率的变化,导致冲击信号的改变,增加了精准信号的提取难度。监测时由于存在杂余干扰,并且随着高效收获机具的研发,使出口物料输出量更大,杂余对监测精度的影响更严重,适应于复杂收获环境精确的监测系统还有待进一步开发与完善。控制系统的延时反馈对筛分装置调节存在滞后现象,通常在联合收获机高速作业时此现象更为明显,以理论模型的创新加快系统的响应是一种解决途径,适应多种谷物和复杂收获环境的控制模型有待开发与完善。

3　研究成果讨论

现有应用于谷物的筛分装置在常规的筛分条件下已基本实现物料的有效分离,但由于物料种类的多样、筛分环境的复杂,筛分时会出现物料堵塞筛孔、潮湿物料流动性差、大喂入量下筛分效率低等问题,针对这些问题,一些非平面筛体、分段式筛体、新筛体材料、带有辅助结构的振动筛、多维筛体驱动机构得以研究,相关学者已通过大量的仿真和试验验证了新型筛体的筛分性能。筛体控制方程的提出、仿生技术在筛分领域的应用、驱动机构动力学理论模型的完善、计算机技术的更新与发展以及台架和田间试验方法和手段的成熟,为筛分装置的研究构建了系统性研究方法。

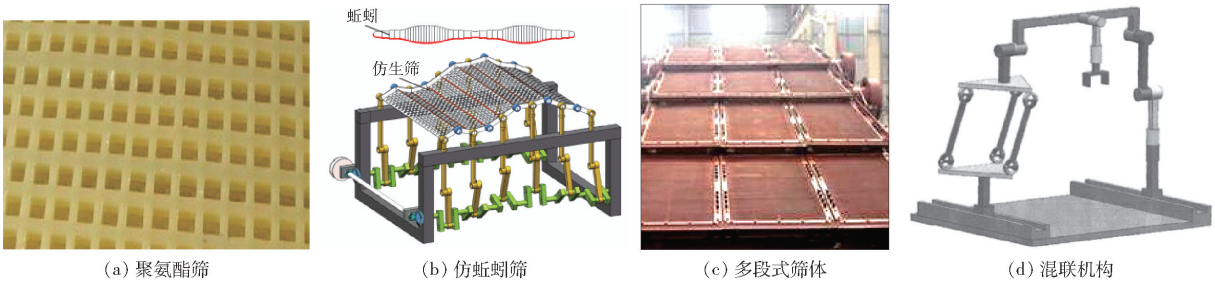
现阶段筛分装置的性能应满足更精准、更高效

表 9 籽粒损失监测与控制系统研究成果

Tab. 9 Research on monitoring system of grain loss

方法	类型	应用
传感	YT-5L 压电陶瓷传感器	基于 YT-5L 压电陶瓷元件的灵敏度高、动态指标测量适应性强等特点,将其作为信号传感器,以圆形敏感板为敏感材料,基于不同物料产生碰撞力和信号差异,实现谷粒损失监控[103-105]
	PVDF 阵列传感器	聚偏二氯乙烯(PVDF)具有质量轻、声抗阻低、耐腐蚀、频响宽等特点[106],基于 PVDF 压电薄膜传感材料,设计出阵列式 PVDF 传感器及相应信号调理电路,可获得籽粒损失的空间分布,实现不同含水率籽粒损失的监测[107]
	阵列式压电晶体传感器	一种阵列式压电晶体传感器,可实现多区域、多角度信息获取,可实时监测谷物清选损失,平均测量误差为 3.3%,可抑制收获工况中的干扰,满足实际应用要求[108]
信号识别	Butterworth 高通滤波器	基于传感器输出信号的频谱特性设计八阶 Butterworth 高通滤波器,有效滤除机组的振动信号以及颖壳、茎秆的冲击信号,可较大程度从机组强噪声背景中提取损失谷粒信号[109]
	双耦合 Duffing 振子检测系统	可实现强噪声背景下谷粒的信号识别,传感器采集信号经过不均匀重复后放入双耦合 Duffing 振子检测系统,使系统进入简谐混沌状态,实现谷粒冲击信号检测以及实时反馈[110]
	支持向量机算法	基于支持向量机玉米籽粒冲击信号识别算法,对籽粒和杂余冲击信号采集并储存,识别籽粒冲击信号特征,基于识别算法计算筛分损失,实现了籽粒损失的实时监测[66]
自适应控制	模糊算法	改进后的油菜清选装置可实现清选参数的调节,一种基于灰色模糊控制算法以单片机为控制器的油菜清选损失自适应控制系统,可加快系统的响应[111]
	神经网络	基于 BP 神经网络建立振动筛结构和运动参数与清选效果之间的关系,检验试验证明了此模型对清选性能具有较高的预测精度[112]

的技术要求[113-114]。新思想和技术的提出与应用为实现更优质、高效的筛分提供了一些可行的方式,如图 7 所示,筛分理论和计算机技术的完善与发展,为筛分装置的研究提供了充足的技术支撑。根据实际生产需求,筛分装置的制造成本、可靠性和稳定性仍需进一步考量与验证[115],农业物料筛分技术仍有很大的进步空间。



(a) 聚氨酯筛 (b) 仿蚯蚓筛 (c) 多段式筛体 (d) 混联机构

图 7 筛分装置创新性成果

Fig. 7 Innovation achievements of screening device

4 展望

4.1 交叉融合与取长补短

筛分技术在农业、矿冶工业、建筑材料工业及化学工业中得到广泛的应用。不同领域的筛分技术研究方法和思路可相互借鉴与补充,例如矿业筛分中,为解决潮湿细粒煤炭流动性差等问题,研究出一些如弹性杆筛[116]、梯流棒条筛[117]、多段阶梯筛[118]、多倾角曲面筛[119]等新筛体,这些新思路和结构的提出可为高含水率谷物的筛分以及降低物料在筛上粘附提供参考;广泛应用于煤炭筛分的香蕉筛[120]和弛张筛[121]的设计理念,也可用于谷物筛分研究中,为防止物料堵塞筛孔、大喂入量谷物高效筛分等研究提供新思路;煤炭筛分中筛体驱动机构可使筛面具有不同的运动形式,通过结构改进与优化可开发应用于谷物筛分机构中。煤炭筛分中已创新设计出 3 移动 3 转动筛体驱动机构[122],这为谷物筛分装置的研究提供了更多的思路,同时也为谷物筛分系统研究的完善和发展,提供了一定的借鉴与参考。

4.2 高质高效与稳定筛分

随着技术的发展,要求筛分装置向大喂入量、高效率、高质量方向发展,防止大喂入量物料筛上堆积是提高筛分效率的关键和难点,提高筛分时物料分散、分层速率是关键,筛体结构和筛体运动融合研究是一种解决途径,现阶段多维运动的筛体通常配置平面筛体,在谷物和煤炭筛分研究中可通过一定的研究方法,将具有空间透筛性能的筛体与筛体多维运动组合,以期实现更高的筛分效率。随着仿生技术的发展,其已被应用于农业中流体机械、水田机械、耕作机械和收获机械等多个领域,因此,在振动

筛体的研究中可应用一些鸟类、家畜、昆虫和爬行动物等具有流动特性的表面特征，以期提高筛上物料的流动性，也为大喂入量谷物筛分装置创新设计提出新的途径。筛分装置工作时通常会出现振动较大和噪声污染问题，影响装置的可靠性和使用寿命，动力吸振与周期结构设计降噪方法[123-124]可应用于筛分装置的设计，优化筛体结构和驱动机构，避免共振现象发生，提高筛分装置可靠性。

4.3　实时控制与精准筛分

随着信息化技术的发展，物料筛分指标在线监测、显示系统、实时反馈等系统需融合与完善，物料喂入量、筛分效率、筛孔堵塞、筛体疲劳强度等由于复杂工作环境产生变化，可通过筛分装置监测和显示系统的反馈，与自动调节系统实现实时筛分参数调节，在变化筛分环境下保证筛分质量。待收获谷物的种类、谷物与杂余的比例、谷物含水率等也是影响筛分的主要因素，为提高筛分装置的适应性，可应用机器视觉和图像处理等技术与筛分系统融合，例如可利用无人机高光谱遥感系统对待收获物料的特性进行捕捉和预测[125]，通过数学模型量化物料特征，实现物料信息的快速获取，并开发先进的算法建立物料特性-筛分参数-装置性能融合模型，优先控制风机转速、振动筛频率、风机出口方向角等实时可调参数，以提高反馈控制的灵敏度。收获时对谷物产量和清选参数进行实时监测和记录，建立物料特性-装置工作参数-产量大数据平台，将田间参数和物料信息进行整合，为后续谷物收获提供精确的参考，实现物料的精准和智能筛分。

参　考　文　献

[1] 郑侃,刘国阳,夏俊芳,等. 振动技术在耕种收机械中的应用研究进展与展望[J]. 江西农业大学学报,2020,43(5):1067-1077.
ZHENG Kan,LIU Guoyang,XIA Junfang,et al. Application of vibration technology in tillage,seeding and harvesting machinery: a review[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis,2020,43(5):1067-1077. (in Chinese)

[2] 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-and-screen cleaning device for cereal combine harvesters[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2018,39(9):5-10. (in Chinese)

[3] 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)

[4] 栗晓宇,杜岳峰,牛兴成,等 玉米清选装置结构优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):233-242.
LI Xiaoyu,DU Yuefeng,NIU Xingcheng,et al. Optimization design and experiment of corn cleaning device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp.2):233-242. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2020s227&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.027. (in Chinese)

[5] 李杰,闫楚良,杨方飞. 联合收割机振动筛的动态仿真与参数优化[J]. 吉林大学学报(工学版),2006,36(5): 701-704.
LI Jie,YAN Chuliang,YANG Fangfei. Dynamic smiulation and parameter optmization of the combine harvester vibration sieve[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2006,36(5):701-704. (in Chinese)

[6] 秦芳. 农业物料振动筛分的生物神经网络建模与试验[D]. 镇江:江苏大学,2020.
QIN Fang. Sieving model of agricultural granular materials using biological neural network and the verification tests[D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2020. (in Chinese)

[7] 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.
SUN 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)

[8] 李耀明,马征,徐立章. 油菜联合收获机筛面粘附物摩擦特性[J]. 农业机械学报,2010,41(12):54-57,47.
LI Yaoming,MA Zheng,XU Lizhang. Tribological characteristics of adhesive materials on cleaning sieve of rape combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(12):54-57,47. (in Chinese)

[9] 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)

[10] 张义峰,衣淑娟. 喂入量对清选性能影响的试验研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2012, 24(4):8-10.
ZHANG Yifeng,YI Shujuan. The experiment research of feed rate on the cleaning performance affect[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University,2012,24(4):8-10. (in Chinese)

[11] 程超,付君,陈志,等. 玉米籽粒收获机清选筛堵塞规律及脱附试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2021,51(2):761-771.
CHEN Chao,FU Jun,CHEN Zhi,et al. Sieve blocking laws and stripping test of corn grain harvester[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2021,51(2):761-771. (in Chinese)

[12] 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 device 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)

[13] 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. Effect of vibration parameters of vibrating screen for harvester on adhesion characteristics of threshed mixtures with different moistures[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 29-36. (in Chinese)

[14] 徐立章,马征,李耀明. 激光改形油菜清选筛面基体浸润特性研究[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):168-171.
XU Lizhang,MA Zheng,LI Yaoming. Wettability of rape cleaning screen surface by laser-textured[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(Supp.):168-171. (in Chinese)

[15] 马征,李耀明,徐立章. 收获期油菜茎秆表面浸润特性研究[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(6):98-103.
MA Zheng,LI Yaoming,XU Lizhang. Wetting property of rapeseed (*Brassica napus* L.) stalk surface[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 98-103. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140616&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.016. (in Chinese)

[16] 李鸿信,李耀明,马征. 联合收获机中清选风机的研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究,2020,42(9):1-5.
LI Hongxin,LI Yaoming,MA Zheng. Research status and development trend of cleaning fans in combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2020,42(9):1-5. (in Chinese)

[17] 郝俊发,韩增德,刘贵明,等. 玉米脱粒机清选装置的研究现状及发展趋势[J]. 安徽农业科学,2016,44(5):322-324.
HAO Junfa,HAN Zengde,LIU Guiming,et al. Research status and development trend of cleaning device of corn thresher[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2016,44(5):322-324. (in Chinese)

[18] 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 advances and prospects in cleaning device of grain[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2013,35(12):225-228. (in Chinese)

[19] 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.

[20] 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):74-77,79.
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.):74-77,79. (in Chinese)

[21] 邓嘉鸣,沈惠平,李菊,等. 三维并联振动筛设计与实验[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(11):342-346,328.
DENG Jiaming,SHEN Huiping,LI Ju,et al. Design and experiment for three-dimensional parallel kinematics vibration sieve[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(11):342-346,328. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20131157&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.057. (in Chinese)

[22] 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):150-154,158.
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):150-154,158. (in Chinese)

[23] 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? flag=1&file_no=20190512&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.012. (in Chinese)

[24] 王晗昊,李耀明,徐立章,等. 小型再生稻联合收获机清选装置的设计与试验[J]. 农机化研究,2021,43(5):85-90,103.
WANG Hanhao,LI Yaoming,XU Lizhang,et al. Design and experimental study of cleaning device of small-scale ratooning rice combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2021,43(5):85-90,103. (in Chinese)

[25] 王冰,胡志超,彭宝良,等. 半喂入四行花生联合收获机弹指筛结构运行参数优化[J]. 农业工程学报,2017,33(21):20-28.
WANG Bing,HU Zhichao,PENG Baoliang,et al. Structure operation parameter optimization for elastic steel pole oscillating screen of semi-feeding four rows peanut combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 20-28. (in Chinese)

[26] 李心平,赵高源,姬江涛,等. 燕麦弧形栅格筛复清选式圆筒筛清选装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(5):124-133.
LI Xinping,ZHAO Gaoyuan,JI Jiangtao,et al. Design and test of cylinder screen oat cleaning device with arc grid sieves and re-cleaning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(5):124-133. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20200513&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.013. (in Chinese)

[27] 王启阳,吴文福,朱浩天. 玉米螺旋式清选装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(20):12-19.
WANG Qiyang,WU Wenfu,ZHU Haotian. Design and test of screw cleaning mechanism for corn[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(20):12-19. (in Chinese)

[28] 王立军,马杨,冯鑫,等. 玉米籽粒收获机分段式振动筛清选装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(9):89 - 100.
WANG Lijun,MA Yang,FENG Xin,et al. Design and experiment of segmented vibrating screen in cleaning device of maize grain harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(9):89 - 100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200911&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.011. (in Chinese)

[29] 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 stepped vibrating screen with cross air for maize 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)

[30] 任露泉,彭宗尧,陈庆海,等. 离心式水泵仿生非光滑增效的试验研究[J]. 吉林大学学报(工学版),2007,37(3):575 - 581.
REN Luquan,PENG Zongyao,CHEN Qinghai,et al. Experimental study on efficiency enhancement of centrifugal water pump by bionic non-smooth technique[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2007,37(3):575 - 581. (in Chinese)

[31] 李世武,佟金,张书军,等. 牛蹄三维几何模型逆向工程研究[J]. 农业工程学报,2004,20(2):156 - 160.
LI Shiwu,TONG Jin,ZHANG Shujun,et al. Three-dimensional geometrical modeling of the exterior configuration of a cattle hoof by reverse engineering technolog[J]. Transactions of the CSAE,2004,20(2):156 - 160. (in Chinese)

[32] 陈勇,佟金,陈秉聪. 黄牛在松软地面行走步态的逆向动力学分析[J]. 农业机械学报,2007,38(10):165 - 169.
CHEN Yong,TONG Jin,CHEN Bingcong. Inverse kinetics analysis of the gait of the cattle bostaurus walking on soft ground [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(10):165 - 169. (in Chinese)

[33] 王立军,武振超,冯鑫,等. 波浪筛式谷物清选机构:201711187073.6[P]. 2019 - 11 - 29.

[34] 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 the cleaning sieve of soybean harvesters [J]. Transactions of the CSAE,2020,36(9):36 - 43. (in Chinese)

[35] 梁苏宁,金诚谦,张奋飞,等. 4LZG - 3.0 型谷子联合收获机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(12):31 - 38.
LIANG Suning,JIN Chengqian,ZHANG Fenfei,et al. Design and experiment of 4LZG - 3.0 millet combine harveste[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(12):31 - 38. (in Chinese)

[36] 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 experiment on air-screen cleaning device of rapeseed combine harvester[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(24):8 - 15. (in Chinese)

[37] 常荣,杜文亮,陈伟,等. 弹球清筛对荞麦分级效率影响的试验研究[J]. 农机化研究,2016,38(3):187 - 190,195.
CHANG Rong,DU Wenliang,CHEN Wei,et al. Experiment study of the influence of bouncing ball screen cleaning on buckwheat's grading efficiency[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016,38(3):187 - 190,195. (in Chinese)

[38] 王立军,李义博,郑招辉,等. 玉米收获机清选装置内杂余抛送器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):124 - 136.
WANG Lijun,LI Yibo,ZHENG Zhaohui,et al. Design and experiment of mechanism of throwing impurity in cleaning device of maize grain harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(4):124 - 136. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190414&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.014. (in Chinese)

[39] 程超,付君,陈志,等. 水稻收获机涂层改性清选筛面设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(2):94 - 102.
CHENG Chao,FU Jun,CHEN Zhi,et al. Design and experiment on modified sieve with coating of rice harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(2):94 - 102. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2002011&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.011. (in Chinese)

[40] 穆培良. 玉米籽粒收获机械高净低损清选筛研究[D]. 长春:吉林大学,2020.
MU Peiliang. Research on high net and low loss cleaning screen of corn grain harvester[D]. Changchun:Jilin University,2020. (in Chinese)

[41] 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? flag = 1&file_no = 20180711&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.011. (in Chinese)

[42] 王成军,李耀明,马履中,等. 小麦籽粒碰撞模型中恢复系数的测定[J]. 农业工程学报,2012,28(11):274 - 279.
WANG Chengjun,LI Yaoming,MA Lüzhong,et al. Experimental study on measurement of restitution coefficient of wheat seeds in collision models[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(11):274 - 279. (in Chinese)

[43] 鲁云松,朱明,陈海军,等. 二自由度振动筛运动学分析及仿真试验[J]. 华中农业大学学报,2017,36(3):107 - 112.
LU Yunsong,ZHU Ming,CHEN Haijun,et al. Kinematic analyses and simulation of two degree of freedom vibration screen[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2017,36(3):107 - 112. (in Chinese)
[44] 王成军,章天雨,郑艳,等. 两自由度往复式滚筒筛茶叶筛分模拟研究[J]. 茶叶科学,2016,36(6):613 - 620.
WANG Chengjun,ZHANG Tianyu,ZHENG Yan,et al. Simulation study on the screening of the reciprocating roller screen with two degrees of freedom for tea[J]. Journal of Tea Science,2016,36(6):613 - 620. (in Chinese)
[45] 荣莉,刘琼,龚冬梅,等. 基于 ADAMS 的制茶三自由度振动筛设计[J]. 牡丹江师范学院学报(自然科学版),2019(2):28 - 30.
RONG Li,LIU Qiong,GONG Dongmei,et al. Design of three degree of freedom vibration screen in processing tea based on ADAMS[J]. Journal of Mudanjiang Normal University (Natural Science Edition),2019(2):28 - 30. (in Chinese)
[46] 王成军,刘琼,马履中,等. 棉籽颗粒在三自由度混联振动筛面上的运动规律[J]. 农业工程学报,2015,31(6):49 - 56.
WANG Chengjun,LIU Qiong,MA Lüzhong,et al. Cottonseed particle motion law in 3-DOF hybrid vibration screen surface[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(6):49 - 56. (in Chinese)
[47] 王立军,段良坤,武振超,等. 上贝壳筛三平移振动齿轮驱动机构:201611204452.7[P]. 2019 - 02 - 12.
[48] 李菊,曾氢菲,邓嘉鸣,等. 多维并联振动筛筛分过程解析与筛面运动形式优选[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11):399 - 407.
LI Ju,ZENG Qingfei,DENG Jiaming,et al. Screening process analysis for multi-dimensional parallel vibrating screen and optimization of screen surface movement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(11):399 - 407. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20161154&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.054. (in Chinese)
[49] 刘晓飞,李耀明,马征,等. 三自由度风筛清选试验研究[J]. 农机化研究,2018,40(6):139 - 144.
LIU Xiaofei,LI Yaoming,MA Zheng,et al. Experimental study on 3-DOF air-and-screen cleaning[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2018,40(6):139 - 144. (in Chinese)
[50] 沈惠平,吕蒙,朱小蓉,等. 一种单自由度 3T1R 并联机构的拓扑设计及其运动学[J]. 中国机械工程,2019,30(8):961 - 968.
SHEN Huiping,LÜ Meng,ZHU Xiaorong,et al. Topological design and kinematics of 3T1R PM with single degree of freedom [J]. China Mechanical Engineering,2019,30(8):961 - 968. (in Chinese)
[51] 王立军,李瑞,于泳涛,等. 玉米籽粒收获机双层不平行振动筛设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(7):130 - 139.
WANG Lijun,LI Rui,YU Yongtao,et al. Design and test of double-layer non-parallel vibrating screens[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7):130 - 139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190713&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.013. (in Chinese)
[52] 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? flag = 1&file_no = 20180616&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.016. (in Chinese)
[53] 王立军,崔友强,郑招辉,等. 振动筛不同运动形式对颗粒群筛分的影响[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(6):119 - 129.
WANG Lijun,CUI Youqiang,ZHENG Zhaohui,et al. Effect of different motion forms of vibrating screen on screening of particle group[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(6):119 - 129. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190613&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.013. (in Chinese)
[54] https://www.nongjitong.com/product/1774.html[EB/OL].
[55] https://www.nongjitong.com/product/caseih_axial-flow-4088-combine_harvester.html[EB/OL].
[56] http://product.cmol.com/reaper/JOHNDEERE/R40_big.html[EB/OL].
[57] http://www.worldnyjx.com/index.php? m = content&c = index&a = show&catid = 157&id = 44[EB/OL].
[58] https://www.fendt.com/de/geneva-assets/livelink/484706-fendtideal-2001-de-v2.Pdf[EB/OL].
[59] https://www.Lovol.com/upload/pdfjs/web/viewer.html? file =/upload/file/2020/11/25/7c0f74e341ca4d1b8a4a2e9b89c911ee.Pdf[EB/OL].
[60] http://www.nongjitong.com/product/claas_lexion760_combine_harvester.html[EB/OL].
[61] http://www.nongjitong.com/product/jdl_c440_combine_harvester.html[EB/OL].
[62] 梁振伟,李耀明,赵湛,等. 切纵流联合收获机夹带损失监测方法[J]. 农业工程学报,2012,30(3):18 - 26.
LIANG Zhenwei,LI Yaoming,ZHAO Zhan,et al. Monitoring method of separation loss in tangential-axial combine harvester [J]. Transactions of the CSAE,2012,30(3):18 - 26. (in Chinese)
[63] MOSTOFI S. Field evaluation of grain loss monitoring on combine JD 955[J]. Advance in Environmental Biology,2010,4(2):162 - 167.
[64] 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)

[65] 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)

[66] 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):100 - 108.
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):100 - 108. 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)

[67] 贾洪雷,王万鹏,陈志,等. 农业机械触土部件优化研究现状与展望[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7):1 - 13.
JIA Honglei, WANG Wanpeng, CHEN Zhi, et al. Research status and prospect of soil-engaging components optimization for agricultural machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(7):1 - 13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170701&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.001. (in Chinese)

[68] 施卫平,任露泉,YAN Yuying. 蚯蚓蠕动过程中非光滑波纹形体表的力学分析[J]. 力学与实践,2005(3):73 - 74.
SHI Weiping, REN Luquan, YAN Yuying. The creeping mechanism of the non-smooth wavy surface of earthworm body[J]. Mechanics in Engineering,2005(3):73 - 74. (in Chinese)

[69] 吴雪桥. 蚯蚓波纹润滑体表减粘降阻特性及耦合仿生研究[D]. 长春:吉林大学,2018.
WU Xueqiao. Study on resistance reduction characteristic of the ripple-lubrication surface and coupling bionic[D]. Changchun:Jilin University,2018. (in Chinese)

[70] 许亚婷,李建桥,孙久荣,等. 蚯蚓体表形貌及润湿性的研究[J]. 华中农业大学学报,2005(增刊 1):40 - 43.

[71] 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):90 - 101.
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):90 - 101. 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)

[72] 张军,谢志江. 基于 Lagrange 方程的 3 - PPR 并联机构动力学分析与仿真[J]. 组合机床与自动化加工技术,2016(8):57 - 60.
ZHANG Jun, XIE Zhijiang. Dynamics analysis and simulation to 3 - PPR parallel mechnism based on Lagrange[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique,2016(8):57 - 60. (in Chinese)

[73] 刘艳梨,朱永梅. 基于 Lagrange 方法的平面双摆机构多体动力学研究[J]. 机械设计与制造,2009(5):75 - 77.
LIU Yanli, ZHU Yongmei. Research on multi-body dynamics for plane double pendulum based on Lagrange's method[J]. Machinery Design & Manufacture,2009(5):75 - 77. (in Chinese)

[74] 白志富,韩先国,陈五一. 基于 Lagrange 方程三自由度并联机构动力学研究[J]. 北京航空航天大学学报,2004,30(1):51 - 54.
BAI Zhifu, HAN Xianguo, CHEN Wuyi. Study of a 3-DOF parallel manipulator dynamics based on Lagrange's equation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astonautics, 2004,30(1):51 - 54. (in Chinese)

[75] 陈根良,王皓,来新民,等. 基于广义坐标形式牛顿-欧拉方法的空间并联机构动力学正问题分析[J]. 机械工程学报,2009,45(7):41 - 48.
CHEN Genliang, WANG Hao, LAI Xinmin, et al. Forward dynamics analysis of spatial parallel mechanisms based on the Newton - Euler method with generalized coordinates[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2009,45(7):41 - 48. (in Chinese)

[76] 沈惠平,肖思进,尤晶晶,等. 一平移两转动并联运动振动筛动力学建模与精度分析[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(2):394 - 400.
SHEN Huiping, XIAO Sijin, YOU Jingjing, et al. Dynamic modeling and precision analysis of parallel vibrating screen with one-translation and two-rotation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(2):394 - 400. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20210239&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.039. (in Chinese)

[77] 赵永生,郑魁敬,施毅. 5 - UPS/PRPU 五自由度并联机床动力学建模[J]. 机械设计与研究,2004(3):45 - 47.
ZHAO Yongsheng, ZHENG Kuijing, SHI Yi. Dynamics modeling of 5 - UPS/PRPU 5-DOF parallel machine tool[J]. Machine Design and Research,2004(3):45 - 47. (in Chinese)

[78] 陈修龙,冯伟明,赵永生. 五自由度并联机器人机构动力学模型[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(1):236 - 243.
CHEN Xiulong, FENG Weiming, ZHAO Yongsheng. Dynamics model of 5-DOF parallel robot mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(1):236 - 243. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20130144&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.044. (in Chinese)

[79] 孙恒,陈作模,葛文杰. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

[80] 王立军,宋慧强,彭博. 两移动两转动振动筛驱动机构设计与分析[J]. 东北农业大学学报,2018,49(6):88 - 96.
WANG Lijun, SONG Huiqiang, PENG Bo. Design and analysis of driving mechanism of 2T - 2R vibrating screen[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2018,49(6):88 - 96. (in Chinese)

[81] https://baike.baidu.com/item/adams/1970135? Fr = Aladdin[EB/OL].
[82] 肖迎春,王霜,来旭忠. 小区收割机分离清选多杆机构设计与分析[J]. 江苏农业科学,2016,44(10):382 - 386.
[83] https://baike.baidu.com/item/matlab/263035? Fr = Aladdin[EB/OL].
[84] 袁世先. 基于 MATLAB 花生收获机振动筛机构的运动学分析[J]. 江苏农业科学,2014,42(2):343 - 345.
[85] https://baike.baidu.com/item/recurdyn/3111932? Fr = Aladdin[EB/OL].
[86] 曾健. 偏心凸轮机构驱动的振动筛的研究[D]. 成都:西南石油大学,2019.
[87] https://baike.baidu.com/item/creo/6642952? Fr = Aladdin[EB/OL].
[88] 张舰. 基于离散元法的曲柄连杆机构振动筛筛分模拟与试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
ZHANG Jian. Numerical simulation and experiment of crank link organization vibration screener based on discrete element method[D]. Yangling:Northwest A&F University,2018. (in Chinese)
[89] https://baike.baidu.com/item/isight%E8%Bd%Af%E4%Bb%B6/563706? Fr = Aladdin[EB/OL].
[90] 赵春龙,杨传华,周海波,等. PFC3D 软件在农业机械定性分析上的应用[J]. 现代化农业, 2015(8):66 - 67.
[91] https://baike.baidu.com/item/pfc2d/4497130? Fr = Aladdin[EB/OL].
[92] 汪晓华,李文昊,何磊,等. 平面圆筛机筛分参数对筛分效率的影响[J]. 轻工机械,2013,31(3):8 - 12.
WANG Xiaohua,LI Wenhao,HE Lei,et al. Influence of tea plane-surface round sifter parameters on sieving efficiency[J]. Light Industry Machinery,2013,31(3):8 - 12. (in Chinese)
[93] https://baike.baidu.com/item/edem[EB/OL].
[94] 刘瑞,闫俊霞,陈国强,等. 基于离散元法的玉米颗粒振动筛分过程模拟研究[J]. 轻工机械,2019,37(3):31 - 34,40.
LIU Rui,YAN Junxia,CHEN Guoqiang,et al. Simulation study of corn particle vibration screening process based on discrete element method[J]. Light Industry Machinery,2019,37(3):31 - 34,40. (in Chinese)
[95] https://baike.baidu.com/item/%E4%Ba%8e%E5%Bb%Ba%E7%Be%A4/6243091[EB/OL].
[96] WANG Yang, YU Jianqun, YU Yanjun, et al. Validation of a coupled model of discrete element method with multibody kinematics to simulate the screening process of a swing-bar sieve[J]. Powder Technology,2019(346): 193 - 202.
[97] https://wenku.baidu.com/view/24f975370b4c2e3f572763ed.html[EB/OL].
[98] XU Lizhang,LI Yang,CHAI Xiaoyu,et al. Numerical simulation of gasesolid two-phase flow to predict the cleaning performance of rice combine harvesters[J]. Biosystems Engineering,2020,190:11 - 24.
[99] MA Zheng,HAN Ming,LI Yaoming,et al. Motion of cereal particles on variable-amplitude sieve as determined by high-speed image analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2020,174:1 - 9.
[100] 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)
[101] 崔友强. 振动筛不同运动形式对玉米颗粒群分散性影响的试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2019.
CUI Youqiang. Experimental study on the effect of different motion forms of vibrating screen on maize particles dispersion [D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2019. (in Chinese)
[102] 杜岳峰,傅生辉,毛恩荣,等. 农业机械智能化设计技术发展现状与展望[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):1 - 17.
DU Yuefeng,FU Shenghui,MAO Enrong,et al. Development situation and prospects of intelligent design for agricultural machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(9): 1 - 17. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190901&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.001. (in Chinese)
[103] 张光跃,金诚谦,杨腾祥,等. 联合收割机清选损失率监测系统设计与实现[J]. 中国农机化学报,2019,40(4):146 - 150.
ZHANG Guangyue,JIN Chengqian,YANG Tengxiang,et al. Design and implementation of cleaning loss rate monitoring system for combine harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2019,40(4):146 - 150. (in Chinese)
[104] 李耀明,陈义,赵湛,等. 联合收获机清选损失监测方法与装置[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(增刊2):7 - 11.
LI Yaoming,CHEN Yi,ZHAO Zhan,et al. Monitoring method and device for cleaning loss of combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(Supp.2):7 - 11. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2013s202&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.002. (in Chinese)
[105] 李耀明,梁振伟,赵湛. 籽粒损失监测传感器敏感板振动特性与试验[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(10):104 - 111.
LI Yaoming,LIANG Zhenwei,ZHAO Zhan. Experiment and vibration characteristics of sensitive plate on grain loss monitoring sensor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(10):104 - 111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20131018&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.018. (in Chinese)
[106] 李耀明,梁振伟,赵湛,等. 联合收获机谷物损失实时监测系统研究[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):99 - 102.
LI Yaoming,LIANG Zhenwei,ZHAO Zhan,et al. Real-time monitoring system of grain loss in combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(Supp.):99 - 102. (in Chinese)
[107] 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 measring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(6):167 - 171. (in Chinese)

[108] 倪军,毛罕平,李萍萍. 阵列式压电晶体传感器谷粒清选损失监测仪设计[J]. 农业机械学报,2010,41(8):175 - 177.
NI Jun,MAO Hanping,LI Pingping. Design of intelligent grain cleaning losses monitor based on array piezocrystals[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(8):175 - 177. (in Chinese)
[109] 倪军,毛罕平,张晓东,等. 谷粒清选损失检测信号的 butterworth 高通滤波器降噪[J]. 农业机械学报,2010,41(6):172 - 176.
NI Jun, MAO Hanping, ZHANG Xiaodong, et al. Application of butterworth filter for testing grain cleaning loss[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(6):172 - 176. (in Chinese)
[110] 高建民,张刚,喻露,等. 联合收割机清选损失传感器谷粒冲击信号的混沌检测[J]. 农业工程学报,2011,27(9):22 - 27.
GAO Jianmin,ZHANG Gang,YU Lu,et al. Chaos detection of grain impact at combine cleaning loss sensor[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(9):22 - 27. (in Chinese)
[111] 仇解. 油菜籽粒清选损失自适应控制系统的设计与试验[D]. 镇江:江苏大学,2020.
QIU Jie. Development and experiment of adaptive control system for rapeseed seed cleaning loss[D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2020. (in Chinese)
[112] 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)
[113] 莫恭武,金诚谦,陈满,等. 谷物联合收割机智能化节粮减损检测装备研发现状浅析[J]. 江苏农机化,2020(6):15 - 18.
[114] 杨猛,胡志超,张延化,等. 农业颗粒物料气力清选装置研究现状与展望[J]. 中国农机化学报,2020,41(3):121 - 127.
YANG Meng,HU Zhichao,ZHANG Yanhu,et al. Research status and prospect of pneumatic cleaning device for agricultural granular materials[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2020,41(3):121 - 127. (in Chinese)
[115] 王乐刚,张晓辉,冷峻,等. 谷物联合收获机清选装置疲劳寿命分析[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):282 - 287.
WANG Legang,ZHANG Xiaohui,LENG Jun,et al. Fatigue life analysis of grain combine harvester cleaning device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):282 - 287. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2018s037&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.037. (in Chinese)
[116] 刘初升,陆金新. 弹性杆筛筛杆碰撞运动的特性分析[J]. 中国矿业大学学报,2009,38(4):476 - 480.
LIU Chusheng,LU Jinxin. Nonlinear characteristic analysis of screening rod of elastic-rod vibrating screen[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2009,38(4):476 - 480. (in Chinese)
[117] 顾永强,方治华,张永红. 基于 Matlab 的梯流棒条筛筛上物料运动分析及仿真[J]. 煤矿机械,2007,28(1):65 - 66.
GU Yongqiang,FANG Zhihua,ZHANG Yonghong. Analysis &simulation of motion for matter on cantilever screen based on Matlab[J]. Coal Mine Machinery,2007,28(1):65 - 66. (in Chinese)
[118] 伦艳春,魏红欣. 阶梯筛面振动筛的设计[J]. 矿业工程,2012,10(3):38 - 39.
LUN Yanchun,WEI Hongxin. Design of the sieve with stepwise screening surface[J]. Minging Engineering,2012,10(3):38 - 39. (in Chinese)
[119] 黄龙. 多段变倾角等厚筛运动学特性及筛分过程协同优化[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.
HUANG Long. Kinematic characteristics of multi stage equal thickness screen with variable inclination and co-optimization of screening process[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2020. (in Chinese)
[120] 赵环帅,杜连涛. 大型高强度香蕉筛结构优化研究[J]. 煤矿机械,2020,41(8):112 - 114.
ZHAO Huanshuai, DU Liantao. Study on structure optimization of large high strength banana screen[J]. Coal Mine Machinery,2020,41(8):112 - 114. (in Chinese)
[121] 王新文,常凯峰,于驰,等. 振动弛张筛运动规律及其实验研究[J]. 煤炭工程,2019,51(8):154 - 159.
WANG Xinwen,CHANG Kaifeng,YU Chi,et al. Motion law and experimental study of vibrating flip-flow screen[J]. Coal Engineering,2019,51(8):154 - 159. (in Chinese)
[122] 刘澜,张功学,李菁. 振动筛七自由度动力学仿真[J]. 煤矿机械,2016,37(2):80 - 82.
LIU Lan,ZHANG Gongxue,LI Jing. Simulation of seven DOF dynamic model for vibrating screen[J]. Coal Mine Machinery,2016,37(2):80 - 82. (in Chinese)
[123] 田源,葛浩,卢明辉,等. 声学超构材料及其物理效应的研究进展[J]. 物理学报, 2019, 68(19): 7 - 18.
TIAN Yuan,GE Hao,LU Minghui,et al. Research advances in acoustic metamaterials[J]. Acta Physica Sinica,2019,68(19):7 - 18. (in Chinese)
[124] 李强,董光旭,张希农,等. 新型可调动力吸振器设计及参数优化[J]. 航空学报,2018,39(6):128 - 140.
LI Qiang,DONG Guangxu,ZHANG Xinong,et al. Design and parameter optimization of a new tunable dynamic vibration absorber[J]. Acta Aercnautica et Astronautica Sinica,2018,39(6):128 - 140. (in Chinese)
[125] 赵春江,薛绪掌,王秀,等. 精准农业技术体系的研究进展与展望[J]. 农业工程学报,2003,19(4):7 - 12.
ZHAO Chunjiang,XUE Xuzhang,WANG Xiu,et al. Advance and prospects of precision agriculture technology system[J]. Transactions of the CSAE,2003,19(4):7 - 12. (in Chinese)