DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2026.01.011

谷物联合收获清选技术研究进展及豆类收获适用性分析

郭子怡[1, 2, 3], 夏先飞[1, 2, 3*], 陈伟[1, 2, 3], 杨光[1, 2, 3], 吴今姬[1, 2, 3], 王申莹[1, 2, 3]

(1. 农业农村部南京农业机械化研究所,江苏南京,210014; 2. 农业农村部现代农业装备重点实验室,江苏南京,210014; 3. 苏州中农院华东农业科技中心,江苏苏州,215300)

摘要:清选是谷物和豆类机械化收获过程中的重要工序,联合收获机中的清选装置是决定收获质量的关键部件。随着农业机械化水平的提高和豆类种植规模的扩大,谷物联合收获机在豆类收获过程中的不适配问题愈发突出,清选环节质量低、损失大,亟须研究适用于豆类收获的高效、高质、低损清选技术与装置。通过阐述国内外联合收获机清选装置整体研究进展以及在筛面结构、运动形式、风机结构等清选装置关键部件方面的研究成果,重点梳理了清选装置气流场、物料颗粒运动方面的研究方法与内容,总结了智能化技术在联合收获机清选装置过程监测与自适应调节方面的研究与应用情况,对谷物联合收获机清选技术研究进行了分析与总结;通过对比豆类与谷物在籽粒特性与杂质种类方面存在的不同,论述了豆类在联合收获清选作业中存在的易破损、清选损失高、脱出物含水率高等特殊点与难点,对谷物联合收获机清选技术在豆类收获的适用性进行分析,总结了当前适用于豆类清选的技术与装置;最后指出了现有联合收获机清选装置存在的清选效果不稳定、适应性与智能化水平低等问题,并针对现有问题对未来豆类联合收获机清选装置的发展趋势进行展望,相关研究成果可为联合收获机清选装置对豆类的适用性改进提供参考。

关键词:谷物;豆类;联合收获;清选装置;智能化;农业机械

中图分类号:S23-0 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-7217(2026)01-0105-13

郭子怡, 夏先飞, 陈伟, 杨光, 吴今姬, 王申莹. 谷物联合收获清选技术研究进展及豆类收获适用性分析[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2026, 7(1): 105-117

GUO Ziyi, XIA Xianfei, CHEN Wei, YANG Guang, WU Jinji, WANG Shenying. Research progress on grain combined harvesting and cleaning technology and analysis of its applicability to legume harvesting [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2026, 7(1): 105-117

0 引言

谷物和豆类是全球主要的粮食和饲料来源,对保障人类粮食安全和主要农产品供给具有重要意义。目前我国主栽的结荚类豆科作物分为大豆和食用豆两大类,同时我国是世界上种植食用豆种类最多的国家[1],因其种类多、地域分散、种植模式多样,故机械化生产难度较大,缺乏先进适用的生产装备。我国豆类对外进口依存度极高,2020年大豆年进口量首次突破1×10^8 t[2],2024年我国大豆对外贸易进口率达83.57%。近年来受国际环境因素影响,国家高度重视豆类生产[3],在历年的中央一号文件中提出"大力实施大豆和油料产能提升工程""多措并举巩固大豆扩种成果"等要求。

联合收获机作为现代农业中实现作物高效机械化收获的关键装备,目前在小麦、玉米、水稻等作物方面应用已较为成熟,但在豆类方面研发起步晚,水平仍相对较低[4],国内尚未建立起完善的豆类收获专用技术与装备体系,大多采用适度改进的稻麦收获机进行作业,无法满足高效生产要求。尤其在清选环节,存在适用性不足、清选效果不佳的问题。随着我国种植结构深化调整,豆类市场需求旺盛[5],高质低损机械化生产技术缺乏已成为制约其产业发展的主要障碍。清选装置作为联合收获机的核心工作部件之一,直接影响着

收稿日期:2025-08-14 修回日期:2026-01-05

基金项目:国家自然科学基金(32472018);国家重点研发计划(2021YFD1600602);湖北省技术创新专项(2022BEC053);财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系-食用豆(CARS-08)资助;新疆维吾尔自治区2025年农机研发制造推广应用一体化试点项目(YTHSD2025-08)

第一作者:郭子怡,女,2002年生,河北石家庄人,硕士研究生;研究方向为农业机械化工程。E-mail: 13021897226@163.com

*通信作者:夏先飞,男,1987年生,重庆人,博士,研究员;研究方向为收获机械化及农业机器人技术。E-mail: xiaxianfei@caas.cn

整机的作业性能[6]。研究联合收获机清选装置在不同作物上的适用性,发展高效、低损的机械化清选筛分技术,对于提升豆类和谷物的收获质量、降低生产成本、推动农业机械化进程具有重要意义。

1 谷物清选技术研究进展

1.1 清选装置分类与工作原理

清选装置按工作原理分为气流式和风筛式两大类[7]。气流式清选装置主要由气流式清选筒、吸风管和风机组成(如图1所示),其工作原理是利用脱出物空气动力学特性差异进行清选,例如气吸式、气吹式、旋风分离式等,气流式清选装置单纯依靠气流作用,受结构和功率限制,适用于喂入量较小的情况,多用在小型或微型联合收获机上。风筛式清选装置是利用气流和筛子配合进行清选(如图2所示),主要由风机、输送系统、振动筛和传动系统组成,这种装置适应性强,清选效率高。其中风机类型主要分为离心式、贯流式(横流式)两种[8],离心风机通过叶轮旋转产生离心力,形成轴向的气流输出,常用作联合收获机的主清选风机;贯流风机形成与风机轴线垂直的气流输出,出口气流沿轴向分布均匀,在双风机系统中,常用作辅助清选风机。筛子类型主要有鱼鳞筛、冲孔筛、编织筛、鱼眼筛等,不同清选筛的清选能力有较大差异。

1.2 典型清选装置构型

现有的国内外联合收获机主要由割台、脱粒装置、清选装置、运送装置、动力传动装置等部件组成。清选机构的主要作用是在收获过程中将脱粒后的物料混合物中的杂质清除干净,以获得清洁的籽粒。目前大中型谷物联合收获机选用的清选装置中风筛式使用比例高达九成[9],其核心部件为振动筛和风机,作为实现物料清选的关键部件,对筛体与风机进行深入研究,对提升清选效率与作业质量至关重要[10],目前国内外联合收获机上应用的典型清选装置见表1。

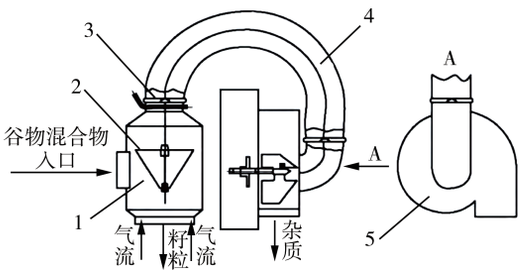


图1 气流式

Figure 1 Airflow type

1. 清选筒 2. 倒锥挡筒 3. 风门 4. 吸风管 5. 吸风机

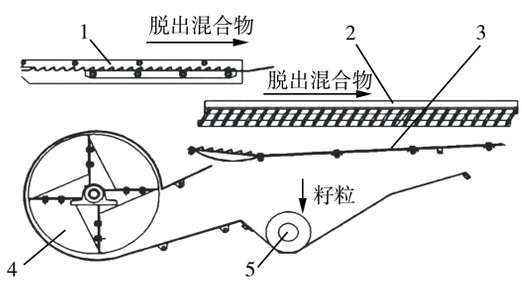


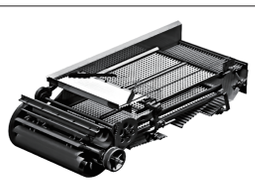
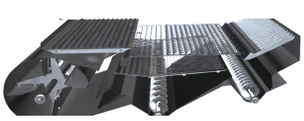
图2 风筛式

Figure 2 Wind sifter

1. 抖动板 2. 鱼鳞筛 3. 编制筛 4. 离心式风机 5. 籽粒输送器

表1 国内外联合收获机上典型清选装置

Table 1 Typical cleaning devices on domestic and foreign combine harvesters

机型型号	示意图	清选装置结构及特点
约翰迪尔R40		采用多叶片卷翼式可调速清选风扇,可提供均匀的风速,上下筛采用可调节开口的鱼鳞式筛片,双层振动筛交错往复振动,机体振动更小
洋马YH1180		采用三风机清选装置,前置贯流风机加双离心风机,并设置了双风路气流进入,改善传统单风道离心风机的清选效果,筛面采用大面积多段筛(鱼鳞筛+燕尾筛)
CLAAS LEXIO系列		采用3个涡轮式双出风口多风道离心式风机,气流速度稳定,横向气流均匀,配备3层可调平鱼鳞筛,对不同地形适应性高
沃得4LZ系列		采用三风道离心式风机,满足振动筛前、中、后部清选需求,配备双层振动筛

国外对联合收获机清选装置的研究起步较早，且种植多为大农场模式，规模化、标准化种植和机械化收获已经较为成熟，收获时普遍使用大中型联合收获机，具有喂入量大，作业效率高的特点，为满足大喂入量的需求普遍采用风筛式清选装置并设计二级清选装置，以彻底清洁物料，提高清选效率。国内对风筛式清选装置的研究一方面聚焦于筛体结构、配置、运动形式的改进与创新；另一方面围绕风机结构以及产生的内部气流场展开研究，旨在通过优化气流分布，提升物料与杂质分离效果。

1.3　关键部件研究现状

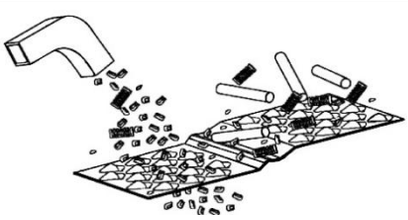
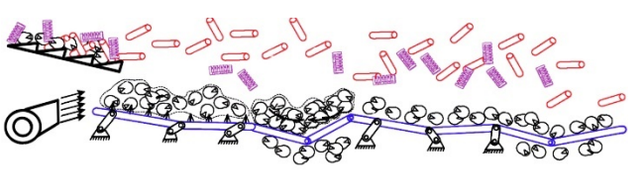
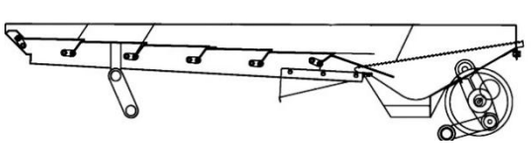
1.3.1　筛体研究

筛体结构直接影响清选效果和作业效率。相关研究集中于传统筛体的改进和新型筛体的创新设计。传统筛片和筛孔的改进主要在孔型、排布方式、材料以及结构优化方面。通过组合不同筛孔结构[11]，提高籽粒透筛率和筛分效率，降低损失率。张宁[12]研发了一种新型清选鱼鳞筛并进行优化试验，在保留了传统鱼鳞筛优点的同时，将筛片尾部基板的长度缩短至 10 mm，降低了对气流的阻挡作用，有效提高了气流的利用效率。材料方面目前研究尝试采用新型聚氨酯橡胶筛代替金属筛[13]，利用表面涂层技术降低黏附[14]，但可靠性与通用性还需进一步验证。

筛体结构创新设计方面，为了提高筛分效率，学者提出了多种新型非平面筛分机构，相关研究成果见表 2。传统平面筛通常前端负荷过大，后端负荷轻，整个筛面利用率不足，而非平面筛体可改变物料流动速度与分布，满足筛体不同区域的筛分要求，使筛面负荷更均匀。同时非平面结构不单纯依赖高频率、高振幅，而是通过优化几何结构来增强分离效果，提高物料翻动性，增大物料与筛面的接触面积，例如波浪筛可以使物料不断翻动、跳跃，增加了籽粒与杂质的分层机会，减少堵塞，提高装置筛分效率。

表 2　筛体结构研究成果

Table 2　Research results on screen body structure

筛体	结构示意图	结构及特点
阶梯式[15]		上筛采用贝壳筛，下筛采用圆孔筛在筛面上设置阶梯缓冲带，籽粒在缓冲带部分暂时停留，从而与杂余分离
分段式[16]		抖动板与前筛、前筛与尾筛之间存在一定的垂直间距，风机在此处产生气流对籽粒和杂余进行分散分层
波浪筛[17]		基于曲柄—双摇杆机构，通过多筛片组合，形成筛片组相对展平和下凹两种状态相互转换，实现整体筛面波浪式运动
搭接式弹齿筛[18]		筛条采用弹指式，形成逐级搭接分段式结构的筛面，利用弹指的弹性振动对物料进行打散和翻动

筛体通过驱动机构产生不同的运动，实现物料的移动、分散与透筛。运动形式可分为二维和多维两种，传统的二维筛分机构为平面往复式，在处理大喂入量时会出现筛面物料堆积的情况。多维振动筛筛面运动形式复杂，物料在筛面上的运动更加分散，有利于提高透筛率和筛分效率。王立军等[19-20]研究了平面往复式、三移动一摆动和三移动两转动振动筛的筛分性能，对比结果表明，相较于平面往复式，多维运动振动筛上粒群的综合分散度分别提高了 14.39%、19.58%。王成军等[21]设计了一种基于并联机构的多维振动筛分试

验台,可实现最多4个自由度的独立或组合振动。试验表明X、Y、Z3自由度组合效果最优。李耀明等[22]提出具有不同初始相位的三维并联振动筛模型,通过运动学分析揭示了初始相位与筛面运动轨迹的关系,研究了初始相位对筛分效率的影响规律,为优化筛面运动提供了新思路。

多维运动通常需要复合传动机构进行驱动,相较于单一平面往复筛,零部件数量增多,结构更加复杂,对加工精度要求高,同时也意味着故障点增多,机构可靠性降低,不利于田间长期作业。目前多数研究停留在实验室试验或小型样机阶段,尚未大规模商品化应用,未来有关多维振动筛的研究,需考虑机构的稳定与可靠性,对其结构、可靠性和装配问题进行系统化研究。

1.3.2 风机研究

传统风机产生的气流难以满足大喂入量下整个筛面的物料筛分要求[23],目前对风机的研究主要通过改变风机结构、设计多风道风机以及多风机协同这3大类方法优化风机性能,改善清选效果。

在风机结构方面,学者通过改变风机外壳、叶轮形式优化气流分布。魏宇飞等[24]优化改进了双出风口风机蜗壳出口管道型线,将蜗壳出口改为圆弧扩散器(如图3所示),在该模型下风机效率提高了16.03%,性能显著提高。刘军帅等[25]通过Fluent流体仿真与样机试验相结合的方法,对影响贯流风机性能的因素进行逐个分析,发现蜗壳形状和出风口上端间隙对风场影响最为显著,通过添加两侧密封板、优化蜗壳形状和后端上口间隙提升风场均速。改进后两侧风场均速提升至12~13 m/s,尾端均速提升至6.5~7.5 m/s。

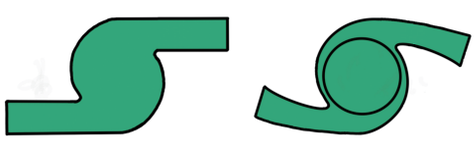


图3 优化前后风机模型对比

Figure 3 Comparison of fan models before and after optimization

在多风道风机方面,其设计思想是针对整个筛面不同位置对气流速度和方向的不同需求,利用不同出风口处的多个风道分别控制筛前、筛中、筛尾的气流。李庆伦等[26]通过台架试验结合响应面优化方法,对小麦联合收获机双出风口多风道离心风机主要参数进行优化,优化后的组合参数经试验损失率和含杂率分别为0.71%和0.43%,满足国标要求。童水光等[27]针对单风道离心风机气流场不均匀的问题,提出了纵轴流全喂入双风道六出风口风机的改进机构,改进后的风机结构可显著提高筛面前部和抖动板区域的气流速度。李洋等[28]自主设计的双出风口四风道风机,通过数值模拟发现增设上出风口,振动筛前部可形成一定的气流,同时后部气流速度回升幅度更大,有利于长茎秆和杂余排出。刘星弈等[29]针对蔬菜种子等小籽粒作物的清选,自主研制了双风道横流吸杂风机(如图4所示),通过数值模拟和风速性能试验验证了该结构风机在横向气流上具有优越性,并得出了最优的组合参数,优化后主吸杂口平均气流为5.22 m/s,次吸杂口平均气流速度为8.15 m/s。多风道风机能够有效提高装置清选性能,但由于清选作业环境比较恶劣,实际应用中存在结构复杂、成本高、维护难度大、操作要求高等缺点。因此需根据具体作业条件和需求,权衡其优缺点。

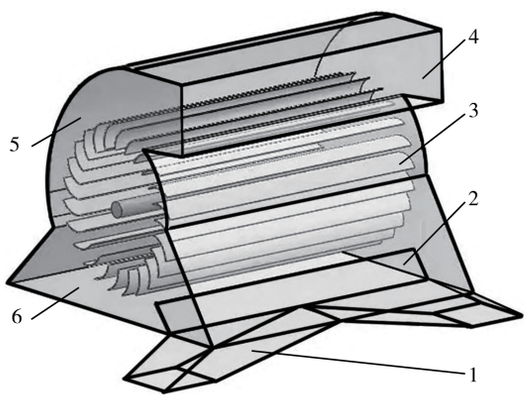


图4 双风道横流吸杂风机

Figure 4 Dual-duct cross-flow dust extraction fan

1. 次吸杂口 2. 导风板 3. 叶轮 4. 排杂口 5. 蜗壳 6. 主吸杂口

在多风机协同方面,其设计思想是通过多个风机协同工作,缓解单风机风量不足以及气流衰减过快的情况,提高清选效果。LIANG等[30]等通过试验发现单离心风机在清选筛前端气流较强,但尾部气流衰减显著,仅为1.65 m/s,而双风机系统模拟和实测的气流流速分别为4.76 m/s和4.03 m/s,证明了在清选筛尾端加装风机具有显著效果。崔俊伟等[31]设计了一种双风机振动筛式清选装置(如图5所示),设置后风机解决了单风机风速因振动筛长度长而衰减过快的问题,能较好地辅助尾筛排出短茎秆。刘师多等[32]设计了一种双风机圆筒筛清选装置,前部离心风机清选下落物料,横流风机吸走筛面上方的轻质杂物。根据现有研究,多风机协同在联合收获机清选装置的应用中具有显著优势,可以弥补传统单风机的气流不足,使气流分布更符合需求,解决清选装置尾部气流小而造成的脱出物清选不彻底的问题。但多风机也意味着功率需求大,能耗大,增加设备运行成本。

此外,国内部分地区受地形、规模条件影响,在山区、丘陵等地区进行联合收获时,更适合用微小型联合收获机进行作业,这类小型谷物联合收获机清选装置多采用气流式清选[33]。刘正怀等[34]设计了一种适用于

丘陵山区作业的微型联合收获机气流式清选装置，该结构无筛分机构，体积小，与没有该装置的微型联合收获机相比，含杂率从7.2%下降到1.2%，效果显著。廖庆喜等[35-37]设计了一种适于油菜联合收获的组合式旋风分离系统以及一种与旋风分离清选装置配合使用的差速圆筒筛，田间试验结果为损失率均值低至5.9%，籽粒清洁率均值达84.4%。气流式清选装置具有体积小、易调节以及工作稳定可靠等优点，造价较风筛式低，但同时也存在功耗和清选损失较大的缺点，适用于作物小区收获作业，在微型联合收获机上应用广泛。

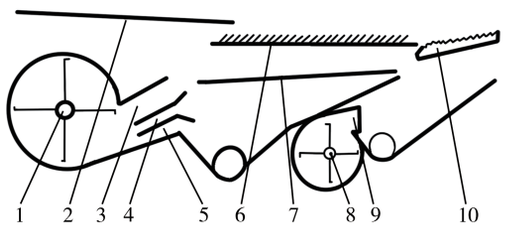


图5　双风机振动筛式示意图

Figure5　Schematic diagram of dual fan vibrating screen

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

1.4　关键技术研究方法

1.4.1　气流场研究

清选装置内部的气流分布对清选过程有着重要影响，筛面气流场分布的均匀程度与清选质量关系密切[38]。目前对气流场研究的方法主要有利用风速仪等设备测量装置内气流速度进行定量研究，利用计算流体力学（computational fluid dynamics，CFD）技术对装置内气流分布进行仿真模拟进行定性研究，还有学者将两种方法结合，相互验证。旨在通过优化清选装置内部气流分布进而优化清选效果。

气流场的定量研究手段有空间布点法和粒子图像测速（particle image velocimetry，PIV）技术，PIV技术可以获取精细的流场信息但实验装置昂贵，操作复杂。目前多数研究采用空间布点法，利用风速仪对装置内气流速度进行测量。李耀明等[39]在DFQX-3型试验台上，使用数字风速仪进行空间布点测量筛面不同位置气流速度，结合Matlab可视化分析，定量表征筛面气流场的对称性、分层性及动态变化规律。李洋等[40]利用热线式风速仪在研制的多风道试验台上进行气流速度测量，发现振动筛上、下方各测点的气流速度随脱出物喂入量的增大而有着不同程度的减小。利用布点法所获取的为真实情况下定时、定点的数据，难以捕捉气流的瞬态变化，同时测点数量有限，被测气流易受干扰，难以全面反映整体分布特征，且无法获取到更多的参数。

气流场的定性研究主要利用CFD技术对装置内部气流场分布进行模拟，得到仿真数据结果，再通过可视化的方式呈现（速度云图、压力云图、气流场速度矢量图等）。余波等[41]基于CFD数值模拟方法研究丘陵山区适用的小型半喂入联合收割机4LBZ-105型联合收割机清选室的气流场分布规律。运用Creo软件建立清选室型腔计算域模型，利用ICEM CFD软件进行网格划分，通过Fluent软件对清选室气流场进行了三维数值仿真，揭示了多参数对气流场的非线性影响机制。宁小波等[42]利用CFD技术研究离心风机转速、叶轮叶片数和出风口角度3个参数对气流场分布的影响。可视化结果的全压云图分析发现：当叶片数为4，叶轮转速1 080 r/min、出风口角度25°时，有利于轻杂余分离。在进行气流场仿真时，需要简化几何模型和边界条件，其中简化实际模型可以方便后续进行仿真，但实际模型如果简化得过于简单会影响对实际流场的分析，造成结果与实际偏差较大，难以完全再现真实工况，所以在进行仿真模拟建立模型时需要寻找一个平衡点，既能简化提高网格质量又能方便结果的分析。

还有学者利用CFD技术进行气流场仿真，再进行测量试验，二者结果相互验证。杜小强等[43]通过数值模拟和试验研究贯流式风筛清选装置内的气流场分布。发现清选室内的气流场存在水平分层现象，层内流场分布平稳，无明显涡流产生，这种气流场分布有助于提高清选效率。王晗昊等[44-45]对再生稻联合收获机清选装置进行研究，运用Fluent软件对其气流场进行数值模拟计算，并使用风速仪对筛面上方各测量面进行了气流速度测定，验证仿真结果的可靠性。采用仿真与试验两者结合的方法，可以相互验证结果，使获得的结果更加准确可靠。

通过研究清选室的气流场分布规律可以为清选结构的优化提供支持，通过试验与模拟，获取内部气流数据，指导风机与振动筛结构的优化设计，提升联合收获机清选性能。但清选装置内气流场与物料流耦合作用十分复杂，具有高度非稳态特征，因此不能只单纯研究气流，还应考虑籽粒、杂质对气流的影响作用。

1.4.2　物料颗粒运动规律研究

在研究物料在筛面上的运动时，需考虑颗粒与筛面之间的碰撞作用以及物料的初始速度，已有的研究发现颗粒在振动筛面上具有非线性运动规律[46-47]。目前清选环节中对物料颗粒运动筛分过程的研究主要有理论分析、数值模拟、实验实测3种方法，实验实测需设计与搭建试验台，配合高速摄像机对物料轨迹进行拍摄，能较准确反映物料实际运动情况，但搭建台架耗时较久，短期内实现难度大，故越来越多学者借助计算机离散元方法对清选过程中物料运动进行仿真，但在

精度上还有待提高。

张文斌等[48]建立物料与清选筛面的碰撞模型,对物料周期运动稳定性进行分析,采用高速摄像机对筛面上的物料进行拍摄,并结合数字图像处理方法得出筛面上物料的运动轨迹,验证了理论分析的准确性。王立军等[49]采用CFD-DEM耦合的方法对玉米脱出物在贯流风筛清选装置中的运动进行模拟,得出脱出物的运动轨迹及各成分在内部的运动情况;利用Matlab模拟出颗粒在不同形式的振动筛筛面上的运动状态;应用数理统计学基本原理,对籽粒在筛上透筛过程分析,得到了单颗粒的透筛概率计算公式[50]。ELSKAMP等[51]对振动参数和时间进行改变,运用离散元方法对球形和非球形颗粒进行模拟,得到了筛分过程中两者的筛分规律。樊荣等[52]开展了不同条件下清选台架试验,揭示了筛下物料横向与纵向分布随清选装置结构参数和运动参数的变化规律,得到离心风机风向角为35°时清选效果较佳。

研究颗粒在筛面上的运动规律可以为清选装置的设计与参数优化提供依据,有助于联合收获机向高效低损方向发展,但目前尚未形成可直接指导筛面设计与参数优化的通用方法,未来需借助离散元方法结合田间验证,进行多尺度仿真,系统性研究复杂工况下的颗粒运动情况。

2 智能化技术研究进展

2.1 清选过程监测技术

清选过程监测包括清选质量以及清选装置工作参数监测。在清选过程监测中,传感器是关键技术手段,国外先进农机通过多传感器数据融合,搭载质量检测模块,实现含杂率、破损率、损失率等指标的实时监控。德国CLAAS LEXION系列联合收获机配备近红外传感器和称重系统,可实时反馈清选含杂率,及时掌握籽粒清选质量,并通过CEMOS系统自动优化风筛参数。国内目前对清选过程监测的研究多集中在籽粒损失方面,清选损失监测传感器主要有声电式和压电式两类。声电式传感器利用声电原理,通过高灵敏麦克风采集物料冲击感应板的声音信号,但收获机内部噪声较大,传感器易受干扰导致精度较差,故应用较少。压电式传感器基于压电效应的原理,实现对加速度、振动、压力等物理量的检测。学者通过对传感器进行改进,利用PVDF(聚偏氟乙烯)压电薄膜、YT-5型压电陶瓷等材料作为敏感元件检测谷物撞击信号。PVDF薄膜适合微小冲击的检测,而YT-5压电陶瓷更适合高精度检测,两者对冲击的响应灵敏,能够快速检测撞击信号。TAN等[53]研制了基于PVDF压电薄膜的清选损失监测系统来实现小麦收获机清洗损失试验台的实时在线监测,并进一步建立了清选损失监测的数学模型,为确定传感器的最佳安装位置提供决策依据。QU等[54]设计了一种基于压电陶瓷的双向阵列压电传感器的清选损失监测装置,通过信号放大模块和核心处理器模块实现对籽粒碰撞信号的采集与识别。

为提高监测的精度,需对传感器采集的信号进行处理,通过滤波方法去除无用信号,再利用这些信息指导调节收获机工作参数。目前学者通过滤波算法和检测系统对信号进行优化处理,提高监测装置的准确度。魏纯等[55]设计了一种采用Kalman滤波方法的籽粒清选监测系统,可用于缩短籽粒撞击板信号的衰减时间,降低信号码间串扰对监测精度的影响,提高籽粒损失监测系统的工作效率。利用传感器或图像系统对清选过程进行监测,可以实时观测记录收获质量,为智能控制提供反馈数据,通过改进传感器和信号处理方法,实现更精准的监测。

2.2 自适应调节技术

国内目前对清选作业时工作参数的调节主要依靠人工调节,对自适应调节方面的研究和应用较为缺乏。现有的研究主要通过监测损失率、含杂率等指标,控制清选装置参数。李国梁等[56]设计了一种脱粒清选试验台,通过控制台中的PLC控制器对风机转速以及清选筛振动频率实现自适应调节。李平等[57]研发了一种适用于丘陵地区的自平衡清选筛,通过平衡调节机构,可根据地势倾斜变化自动调整筛箱角度,确保清选均匀性。LIU等[58]将自适应清洗系统集成到大豆联合收割机中,与改进前相比,损失率和杂质率分别降低0.19%和0.98%。

部分学者将PID控制、模糊控制、神经网络控制等应用到清选装置自适应控制研究中。传统的单纯PID控制在非线性、多参数、复杂的清选过程中效果不好,模糊控制是一种非线性控制,适用于清选工作环境中。针对收获作业过程中的非线性与时变性特性,仇解[59]以灰色预测模糊控制理论为基础,设计了以单片机为控制器的联合收获机清选损失自适应控制系统,解决了清选损失自适应控制系统中的滞后问题。神经网络控制是一种基于神经网络的智能控制技术,适用于处理复杂的非线性、不确定系统的控制问题,能够在没有精确数学模型的情况下,对系统进行建模、优化计算、推理和故障诊断等。朱永乐等[60]运用RecurDyn和EDEM联合对水稻籽粒筛分过程仿真,基于Matlab设计BP神经网络预测模型,随机选择样本对模型进行多次训练,最终模型能够较好地预测不同转角下的变振幅筛分效率和含杂率的变化趋势。

由于整个清选过程工作环境复杂、影响因素众多,

目前在清选装置自适应调控方面国内还处于研究阶段，还未大范围实际应用，但随着边缘计算和5G技术的普及，可支撑清选设备向着自适应控制系统方向发展，使清选装置能根据作业对象与环境的变化而自动调节，实现清选过程的自动化与智能化，提高收获机适应性，为智能农业提供支持。

2.3　大数据和人工智能技术

传统农业机械操控需依赖操作员的多年积累的操作经验，而人工智能技术的训练则可以在较短的时间内完成。随着大数据、深度学习以及人工智能的发展，已有学者开始将人工智能与机械联合收获清选结合起来。CHEN 等[61]通过大数据和人工智能技术，利用图像识别技术实时采集图像，经人工智能芯片处理数据后再通过人工智能控制器对参数进行调整。与传统农业机械相比，人工智能机械在操作过程中更加便捷，可以借助人工智能实现关键模块快速切换，提高收获机的多作物适应性和智能化水平。

清选过程的智能化包含传感器技术、信号处理、数学建模、自动控制系统等多个方面。需通过不断的技术创新和实验验证，开发多种高效的监测、控制系统，结合新兴技术，实现对整个清选过程的实时监测与闭环控制，推动清选系统的智能化和信息化发展。

3　豆类收获适用性分析

3.1　豆类收获清选特点

3.1.1　籽粒易破损、清选损失大

谷物籽粒粒径较小，形状相对规则，而大部分豆类籽粒形状不规则，例如芸豆、蚕豆、豇豆等呈扁平或椭圆形，在清选装置中易滚动碰撞，局部应力集中导致开裂。大豆、豌豆等豆类籽粒蛋白质含量高，质地脆硬，抗冲击能力弱，清选过程中易破损。谷物杂质以轻杂和小粒杂质为主，而豆类经收获脱粒后，茎叶和豆荚碎片混杂，既有轻杂也有重杂和大块杂质。传统清选方式效率较低，籽粒与杂质分离不彻底，单纯提高清选风机的风量，又会将质量较轻的籽粒吹出，提高清洁率的同时会造成较高的损失率。

3.1.2　脱出物含水率高

豆类机械化收获对收获时期要求严格，一些豆类品种需要在部分籽粒还未完全成熟时便进行收获，脱粒后茎秆、荚、籽粒含水率普遍较高且不均匀，以绿豆为例，机械化一次性收割最佳收获期时约有10%的未完全成熟豆荚，豆荚含水率可高达70%，致使脱出物含水率高，物料流动性差，易黏附筛体和堵塞筛孔，导致筛上物料堆积，影响清选性能。

3.1.3　专用机型成本高

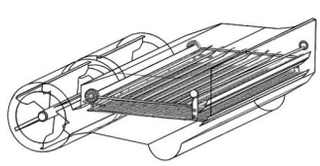
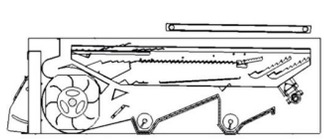
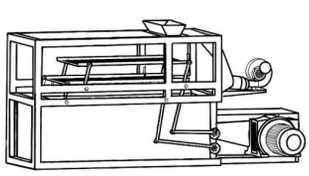
目前谷物联合收获机已规模化生产，价格相对较低，豆类经济价值高，机械化收获清选时对低损要求更高，需要适应不同种植模式，结合不同豆类品种的形状和物理特性差异，设计具有针对性的筛网，进行专用机械设计，成本较高，我国豆类长期处于中小规模生产且种植种类和模式多样，实行机械化清选的难度大。

3.2　豆类清选结构研究进展

当前谷物联合收获在清选方面的研究成果可用于豆类机械化收获，但其适用性还需进一步研究。针对谷物联合收获机清选装置对豆类清选适用性低的问题，目前研究多集中于单一清选筛和筛体部分结构的优化工作，对于筛体组合优化的研究较少，刘鹏等[62]针对谷物收获机对大豆适用性低的问题，对清选筛上筛、下筛、尾筛组合进行优化，得出较优的上筛、下筛和尾筛的组合。

表3　适用于豆类的清选装置

Table 3　Cleaning device for beans

名称	结构示意图	结构特点
小型绿豆联合收获机风筛式清选装置		筛面采用“f”型百叶窗筛和编织筛对脱出物进行多次筛选，风机采用并联式六叶片离心风机，气流速度高，可以更好地分离杂质与绿豆，提升绿豆收获后的清选效果[63]
单纵轴流式大豆联合收获机清选装置		结构包括清选筛、回程输送装置及壳体，通过设置回程输送装置大大降低大豆清选损失率[64]
双斜面风筛式绿豆清选装置		上、下两筛面同步进行平动。设计不同筛孔大小，有效地将绿豆与杂质分离开来，实现对绿豆的清选操作[65]

当前豆类生产过程中仍缺乏高效适用的专用化清选装置，针对豆类作物进行的专用性清选装置设计研发较少，相关研究成果见表3，研究旨在通过对清选装置结构方面进行创新，来降低清选损失率，提高清选效果。在清选原理方面谷物与豆类具有适配性，大豆、绿豆等与谷物都属于颗粒状籽粒，通过气流分离轻杂质，筛网分离大杂质，调整清选参数降低损失率的基本工作原理对豆类依然适用。而豆类清选的关键难点在于

其多数豆种籽粒形状不规则、几何尺寸差异大,清选时易造成籽粒损失率与破损率大,影响商品质量[66]。通过设计新型豆类清选系统、针对具有特殊物理特性的豆类加装专用清选辅助部件等来提高联合收获机对豆类品种的适配性,满足豆类高质低损的收获需求。

4 现存不足及未来发展趋势

4.1 现存不足

4.1.1 清选效果不稳定

联合收获机中多运行于复杂的工况下,清选过程中风量与筛面匹配度不足,会使风量在筛面分布不均匀,产生清选死角,导致杂质分离不彻底,清选性能有限。传统的谷物联合收获机清选装置在面对高喂入量和高含水率的物料时,物料容易在筛面上堆积,造成筛孔堵塞,气流难以穿透物料,轻杂无法被吹走,含杂率上升,筛分效率降低,清选性能下降甚至作业中断。而在强风或筛面振动不合理的情况下,将容易造成籽粒夹带损失,导致损失率上升。

4.1.2 不同品种之间的适应性不足

不同品种作物籽粒形状和杂质类型存在差异,通用设计会导致适应性差。现有谷物联合收获机清选装置虽然可以通过更换筛网以及调整结构参数等来适应不同作物收获需求,但调节范围不足,导致不同品种间依然无法完全达到适配状态,导致许多作物“无好机用”“有机无用”的矛盾较为突出。

4.1.3 智能化水平低

目前许多联合收获机清选装置的智能化技术成果仍然处于试验或小规模应用水平,商品化程度低。监测部分传感器可靠性差,容易受振动干扰,导致监测误差大,在风机转速、筛面倾角等参数方面缺乏实时监测与响应机制,仍然以人工调节为主,难以及时优化工作参数,调节滞后,精度不高,清选质量依赖驾驶员水平。

4.1.4 能耗与噪声大

现有联合收获机清选装置大多缺乏节能调控机制,进行小范围收获或喂入量较小的情况下也要维持高能耗,运行期间风机高速运转和筛面剧烈振动产生的噪声较大,影响清选装置的使用寿命以及驾驶员舒适性。

4.2 未来发展趋势

现有清选技术在谷物的收获过程中表现较为优秀,但面对豆类作物的特殊需求,仍存在一些技术难点和挑战,随着清选技术的不断发展和优化,未来的清选技术发展将更加注重高效低损、专用化和智能化,以适应不同作物的收获需求。

4.2.1 高效、低损清选

豆类市场价值通常较高,破损的豆粒会降低销售品质而且更容易产生霉变,造成经济损失。随着对食品质量要求的提高,市场对豆类产品的外观与完整性也提出了更高的要求,例如绿豆、红小豆等,破损豆粒会大幅度影响其商品价值。同时豆类种植规模不断扩大,也对豆类机收效率提出了更高的要求。未来豆类联合收获机必然会向着更高的清选效率和清选质量方向发展,需提高作业能力、清选效率与质量。通过采用弹性或柔性材料,研究新型柔性清选机构,降低清选振动过程中的豆粒破损率;在输送过程增加缓冲结构与减震装置,减少对豆类的机械冲击,保护籽粒;设计大尺寸筛网和风选装置,在保证筛分质量的同时增大筛分面积,以适应大喂入量,满足大规模种植的需求。

4.2.2 专用性设计

不同于机械化技术已经较为成熟的谷物联合收获机,现有豆类联合收获机清选装置,大多是谷物联合收获机风筛式清选装置改变作业参数而成,而豆类品种更加特殊和复杂,籽粒与杂质分离难度更大,清选要求更高,需针对豆类作物的特性和作业需求设计专用清选系统,使豆类机收清选装置与各豆种特性相匹配,提高适应性和清选效果。同时结合模块化设计,设置可更换的清选筛网和风选系统,使得豆类收获机在不同豆种之间具备一定的广适性,在保证豆类专用性能的基础上实现不同豆种的清选,降低生产成本,满足现代农业的多样化需求。

4.2.3 智能化发展

智能化的核心目标是提高农业生产效率,减少人力成本,降低资源浪费,实现精准农业。未来豆类联合收获机清选系统需向着更精准、自动的方向发展。通过先进传感器实现多方位工作质量的实时精准监测,监测损失率、含杂率、清选率等指标,自动调节风机转速、筛片开度、筛体振幅等参数;集成各种传感器,实时监测农田中的作物状况和环境条件,为清选装置提供数据支持,将收集的数据集成到云端系统,通过数据分析和算法优化,实现智能监控、自适应调节和精准控制,提升智能化程度。

4.2.4 多学科交叉融合

未来清选技术的研究可向着多学科交叉融合、跨学科合作的方向发展,在筛体结构研究方面结合相应的品种特性,与材料科学、流体力学甚至生物学等学科合作,借鉴自然界的分离原理,结合轻量化材料研究,通过跨学科合作实现创新突破,进一步提升筛分效率和能耗比,推动豆类清选装置向高质量方向发展。

参 考 文 献

[1] 王珅, 周斌, 范保杰, 等. 食用豆种质资源表型数据分析系

统的设计与构建[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(10): 63－70.
WANG Shen, ZHOU Bin, FAN Baojie, et al. Design and construction of phenotype data analysis system for food legumes germplasmre sources [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2023, 51(10): 63－70.

[2] 胡壮壮, 王路路, 姜雪冰, 等. 我国大豆产业发展现状分析及对策[J]. 大豆科技, 2023(4): 1－11.
HU Zhuangzhuang, WANG Lulu, JIANG Xuebing, et al. Analysis and countermeasure of soybean industry development status in China [J]. Soybean Science & Technology, 2023(4): 1－11.

[3] 张慧, 怀燕, 周伟军, 等. 浙江省大豆油料产业现状及未来展望[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2023, 49(4): 454－462.
ZHANG Hui, HUAI Yan, ZHOU Weijun, et al. Current status and future prospects of soybean and oil crop production in Zhejiang Province [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2023, 49(4): 454－462.

[4] 夏先飞, 陈巧敏, 肖宏儒, 等. 我国食用豆机械化收获技术发展现状及对策[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(5): 22－28.
XIA Xianfei, CHEN Qiaomin, XIAO Hongru, et al. Research on current status and developing strategy of pulese crops mechanized harvesting technology in China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(5): 22－28.

[5] 陈红霖, 田静, 朱振东, 等. 中国食用豆产业和种业发展现状与未来展望[J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 493－503.
CHEN Honglin, TIAN Jing, ZHU Zhendong, et al. Current status and future prospective of food legumes production and seed industry in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(3): 493－503.

[6] 王国欣, 师清翔, 刘师多, 等. 物料状态对圆筒式短茎秆清理装置性能的影响[J]. 农业机械学报, 2002(4): 52－54.
WANG Guoxin, SHI Qingxiang, LIU Shiduo, et al. Effects of the state of materials on performance of a drum device of short stem cleaning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002 (4): 52－54.

[7] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 1－16.

[8] 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.

[9] 刘海龙. 谷物联合收获机清选机构原理与清选质量提升思路[J]. 农机使用与维修, 2022(2): 39－41.
LIU Hailong. Cleaning mechanism principle and cleaning quality improvement idea of grain combine harvester [J]. Agricultural Machinery Using & Maintenance, 2022 (2): 39－41.

[10] 侯杰, 谢方平, 刘大为, 等. 联合收获机风筛式清选装置研究进展[J]. 农业工程与装备, 2020, 47(3): 12－17.
HOU Jie, XIE Fangping, LIU Dawei, et al. Research progress on air-and-screen cleaning device for combined harvester [J]. Agricultural Engineering and Equipment, 2020, 47(3): 12－17.

[11] 王立军, 冯鑫, 郑招辉, 等. 玉米清选组合孔筛体设计与试验[J]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 104－113.

[12] 张宁. 玉米籽粒收获机鱼鳞筛清选装置工作机理及优化分析[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
ZHANG Ning. Research on working mechanism and optimization analysis of chaffer sieve cleaning device in corn grain harvester [D]. Changchun: Jilin University, 2022.

[13] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 90－96.

[14] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 94－102.

[15] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 115－123.

[16] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 89−100.

[17] 冯鑫, 王立军, 于琨蒙, 等. 玉米籽粒清选波浪筛机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 142−154.
FENG Xin, WANG Lijun, YU Kunmeng, et al. Design and experiment of mechanism of wave screen for maize grain cleaning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 142−154.

[18] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(21): 20−28.

[19] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 119−129.

[20] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 138−145.

[21] 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]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 70−74, 112.
WANG Chengjun, LI Yaoming, MA Lüzhong. Design of multi-dimensional vibration screening test bench based on parallel mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 70−74, 112.

[22] 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]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 88−95.
LI Yaoming, LIU Xiaofei, MA Zheng, et al. Investigation on three-dimensional parallel screening performance based on initial phase of different branches [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 88−95.

[23] 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.

[24] 魏宇飞, 叶学民, 肖为, 等. 多出口离心风机的性能研究与优化设计[J]. 风机技术, 2025, 67(2): 31−38.
WEI Yufei, YE Xuemin, XIAO Wei, et al. Performance research and optimization design for multi-outlet centrifugal fans [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2025, 67(2): 31−38.

[25] 刘军帅, 杜新武, 杨大芳, 等. 收获机械贯流风机结构参数优化研究[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(7): 7−11.
LIU Junshuai, DU Xinwu, YANG Dafang, et al. Optimization of structural parameters of a harvester cross-flow fan [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(7): 7−11.

[26] 李庆伦, 金诚谦, 滕悦江, 等. 双出风口多风道离心风机清选装置主要参数试验优化[J]. 农机化研究, 2021, 43(5): 190−196.
LI Qinglun, JIN Chengqian, TENG Yuejiang, et al. Experimental optimization of main parameters of multi-channel centrifugal fan with double outlet [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(5): 190−196.

[27] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 135−142.

[28] 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.

[29] 刘星弈, 王升升, 姬江涛, 等. 双风道横流风机设计与吸气特性试验[J]. 农机化研究, 2025, 47(9): 155−161.
LIU Xingyi, WANG Shengsheng, JI Jiangtao, et al. Design and suction characteristics test of double air ducts cross flow fan [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(9): 155−161.

[30] LIANG Y Q, TANG Z, ZHANG H, et al. Cross-flow

fan on multi-dimensional airflow field of air screen cleaning system for rice grain [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(4): 223－235.

[31] 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, 14.
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, 14.

[32] 刘师多, 王显仁, 师清翔, 等. 双风机圆筒筛清选机构内流场的试验研究[J]. 中国农机化, 2005(6): 69－71.
LIU Shiduo, WANG Xianren, SHI Qingxiang, et al. Testing research on flow field of the two-fan cylinder′ sereen cleaning mechanism [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2005(6): 69－71.

[33] 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.

[34] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 102－108.

[35] 廖庆喜, 万星宇, 李海同, 等. 油菜联合收获机旋风分离清选系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 24－31.
LIAO Qingxi, WAN Xingyu, LI Haitong, et al. Design and experiment on cyclone separating cleaning system for rape combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14): 24－31.

[36] 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.
WAN Xingyu, SHU Caixia, XU Yang, et al. Design and experiment on cylinder sieve with different rotational speed in cleaning system for rape combine harvesters [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(14): 27－35.

[37] 万星宇, 廖宜涛, 袁佳诚, 等. 油菜联合收获机组合式旋风分离清选参数分析与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S2): 202－211.
WAN Xingyu, LIAO Yitao, YUAN Jiacheng, et al. Parameters analysis and experiment of cyclone separation cleaning system with replaceable parts for rapeseed combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S2): 202－211.

[38] 钟挺, 胡志超, 顾峰玮, 等. 4LZ-1.0Q型稻麦联合收获机脱粒清选部件试验与优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 76－81.
ZHONG Ting, HU Zhichao, GU Fengwei, et al. Optimization and experiment for threshing and cleaning parts of 4LZ-1.0Q cereal combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 76－81.

[39] 李耀明, 唐忠, 李洪昌, 等. 风筛式清选装置筛面气流场试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 80－83.
LI Yaoming, TANG Zhong, LI Hongchang, et al. Experiment on the flow field of the air-and-screen cleaning device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 80－83.

[40] 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): 48－55.
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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(12): 48－55.

[41] 余波, 王强, 王霜. 基于Fluent的风筛式清选室气流场的仿真[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(7): 358－361.
YU Bo, WANG Qiang, WANG Shuang. Simulation of air flow field in air-screen cleaning room based on fluent [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(7): 358－361.

[42] 宁小波, 许磊, 孙春虎, 等. 联合收获机多风道清选装置气流场分布与风机参数优化[J]. 农机化研究, 2019, 41(6): 32－37.
NING Xiaobo, XU Lei, SUN Chunhu, et al. Fan′s parameters optimization and internal flow field distribution in multi-duct cleaning device of combine harvester [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(6): 32－37.

[43] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(3): 27－34.

[44] 王晗昊, 李耀明, 徐立章, 等. 再生稻联合收获机清选装

置内部气流场分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 84－92.
WANG Hanhao, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Simulation and experiment of air flow field in the cleaning device of ratooning rice combine harvesters [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering , 2020, 36(20): 84－92.

[45] 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.

[46] 孙进. 基于高速摄像的风筛式清选装置中物料运动规律的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2007.
SUN Jin. Study on motion law of materials in air-and-screen cleaning mechanism based on high-speed imaging system [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007.

[47] 刘初升, 陆金新. 筛分过程中颗粒运动的非线性特性研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(4): 556－559.
LIU Chusheng, LU Jinxin. Study on nonlinear characteristic of particle motion during the process of coal secreening [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(4): 556－559.

[48] 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(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(5): 21－24.

[49] 王立军, 李洋, 梁昌, 等. 贯流风筛清选装置内玉米脱出物运动规律研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 122－127.
WANG Lijun, LI Yang, LIANG Chang, et al. Motion law of maize mixture in cross air-and-screen cleaning device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 122－127.

[50] 王立军, 马继卿, 张传根, 等. 贯流风筛清选籽粒透筛模型研究[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(10): 97－101.
WANG Lijun, MA Jiqing, ZHANG Chuangen, et al. Study on the model of grain traversing the holes of the screen in cross air-and-screen cleaning device [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2015, 46(10): 97－101.

[51] ELSKAMP F, KRUGGEL-EMDEN H, HENNIG M, et al. Discrete element investigation of process models for batch screening under altered operational conditions [J]. Powder Technology, 2016, 301: 78－95.

[52] 樊荣, 崔清亮, 卢琦, 等. 风筛式清选装置筛下物料分布规律研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(1): 142－151.
FAN Rong, CUI Qingliang, LU Qi, et al. Study on distribution law of materials under sieve in air-and-screen cleaning device [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(1): 142－151.

[53] TAN D L, GENG D Y, SU G L, et al. Monitoring method and test of wheat harvester loss rate based on PVDF sensor [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1423(1): 012033.

[54] QU Z, LU Q, SHAO H H, et al. Design and test of a grain cleaning loss monitoring device for wheat combine harvester [J]. Agriculture, 2024, 14(5): 671.

[55] 魏纯, 李明, 余良俊, 等. 基于Kalman滤波的联合收获机籽粒清选损失监测研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(3): 23－27.
WEI Chun, LI Ming, YU Liangjun, et al. Research on loss monitoring of grain cleaning in combine harvester based on Kalman filter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(3): 23－27.

[56] 李国梁, 杨诚, 徐祝欣, 等. 一种脱粒清选试验台[P]. 中国专利: 202510436850.4, 2025－07－01.

[57] 李平, 张艺辉, 周麒龙, 等. 一种自平衡清选筛和收获机[P]. 中国专利: 202421683642.1, 2025－05－09.

[58] LIU P, WANG X Y, JIN C Q. Research on the adaptive cleaning system of a soybean combine harvester [J]. Agriculture, 2023, 13(11): 2085.

[59] 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 Xie. Development and experiment of adaptive control system for rapeseed seed cleaning loss [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.

[60] 朱永乐, 马征, 陈树人, 等. BP神经网络预测变振幅防堵筛分性能研究——基于EDEM-RecurDyn仿真[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(11): 75－80.
ZHU Yongle, MA Zheng, CHEN Shuren, et al. Study on BPNN prediction of variable amplitude anti-blocking sereening performance: Based on EDEM-RecurDyn simulation [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(11): 75－80.

[61] CHEN X S, TANG H Z, XUE Z Y, et al. Intelligent control of threshing and cleaning system based on big data [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1651(1): 012014.

[62] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(9): 36－43.

[63] 邓兴旭. 丘陵山区绿豆联合收割机脱粒清选装置的设计

与试验[D]. 重庆：西南大学，2022.
DENG Xingxu. Design and experiment of threshing and cleaning device of mung bean combine harvester in hilly and mountainous areas[D]. Chongqing: Southwest University, 2022.
[64] 金诚谦，郭红星，康艳，等. 一种单纵轴流式大豆联合收获机清选装置[P]. 中国专利：2020115083 39.4，2021－04－16.
[65] 贺俊林，卢家宣，郭彦汐，等. 一种双斜面风筛式绿豆清选装置[P]. 中国专利：202323021160.8，2024－07－09.
[66] 赵越云，王鹏，杜新武，等. 油莎豆高效低损机械收获技术研究现状与趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2025，6(4)：24－39.
ZHAO Yueyun, WANG Peng, DU Xinwu, et al. Research status and trend of high-efficiency and low-damage mechanical harvesting technology for Cyperus esculentus [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(4): 24－39.

Research progress on grain combined harvesting and cleaning technology and analysis of its applicability to legume harvesting

GUO Ziyi[1, 2, 3], XIA Xianfei[1, 2, 3*], CHEN Wei[1, 2, 3], YANG Guang[1, 2, 3], WU Jinji[1, 2, 3], WANG Shenying[1, 2, 3]

(1. *Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing* 210014, *China*; 2. *Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing* 210014, *China*; 3. *East China Agricultural Science and Technology Center, Suzhou* 215300, *China*)

Abstract: Cleaning is a critical process in the mechanized harvesting of grains and legumes, with the cleaning device in combine harvesters being the key component determining harvest quality. As agricultural mechanization advances and legume cultivation expands, the mismatch between grain combine harvesters and legume harvesting has become increasingly prominent. This results in low cleaning quality and significant losses, urgently requiring research into efficient, high-quality, low-loss cleaning technologies and devices suitable for legume harvesting. By reviewing global research progress on combine harvester cleaning systems and key component developments, which include sieve structure, motion patterns, and fan design, this study systematically examines research methodologies and findings related to airflow dynamics and material particle movement within cleaning mechanisms. It summarizes the application of intelligent technologies for process monitoring and adaptive adjustment in combine harvester cleaning systems, providing an analytical overview of grain combine cleaning technology research. By contrasting differences in seed characteristics and impurity types between legumes and grains, this section discusses the unique challenges in legume harvesting, which include susceptibility to damage, high cleaning losses, and high moisture content in separated materials, and analyzes the applicability of grain combine cleaning technology to legume harvesting. It summarizes current cleaning technologies and devices suitable for legumes. Finally, it highlights existing issues with current combined cleaning devices, including unstable cleaning performance, low adaptability, and inadequate intelligence levels. Based on these challenges, it outlines future development trends for bean combine cleaning devices. The research findings provide valuable references for enhancing the suitability of combined cleaning systems for bean harvesting.

Keywords: grains; legumes; combine harvesters; cleaning equipment; intelligent; agricultural machinery

Foundation items: National Natural Science Foundation of China(32472018); National Key Research and Development Program of China (2021YFD1600602); Special Program for Technological Innovation of Hubei Province of China (2022BEC053);Supported by the Earmarked Fund for CARS(CARS-08);Pilot Project of Integrated R&D, Manufacturing, Promotion and Application of Agricultural Machinery in Xinjiang Uygur Autonomous Region in 2025(YTHSD2025-08)

First Author: GUO Ziyi, E-mail: 13021897226@163.com

* **Correspondence Author:** XIA Xianfei, E-mail: xiaxianfei@caas.cn