DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2025.04.009

工厂化育秧育苗智能播种性能检测技术应用现状与趋势

邹学杰[1, 2], 刘大为[1, 2, 3, 4*], 秦锋[1, 2], 李旭[1, 2, 3, 4], 徐新明[1, 2], 龚明[3, 4]

(1. 湖南农业大学机电工程学院,湖南长沙,410128; 2. 智能农机装备湖南省重点实验室,湖南长沙,410128; 3. 农业农村部南方智能育秧(苗)重点实验室,湖南益阳,413055;
4. 湖南省智能育秧育苗装备工程技术研究中心,湖南益阳,413055)

摘要:随着农业科技的发展,工厂化育秧育苗技术在现代农业生产中逐渐成为重要的组成部分。智能播种检测技术的引入,显著提高了育苗过程的效率与精准度,推动了农业生产的智能化和自动化进程。播种智能检测是实现工厂化育秧育苗高效生产的关键。播种检测技术逐步从光电检测、电容检测转变为视觉检测与高光谱技术相结合等方式。概述了光电检测、电容检测、视觉检测、高光谱检测技术方法的适用对象,总结了现有光电、电容、视觉检测技术的优劣。在光电检测中研究人员一般在检测指标、重漏播检测、高尘环境检测精度改进3个方面进行研究,一般适用于大豆、玉米等大颗粒作物,对于电容检测主要分析电容结构对播种检测的影响,除极板结构优化方面外,通过信号处理进行算法优化,降低环境和信号干扰,提升了检测精度和工作稳定性,减少了误差率。对于视觉检测国内外研究主要针对漏播、种子流、种子下落速度、种子检测算法模型以及深度学习算法创新等方向研究,针对传统检测技术精度不高、电容检测距离远近、视觉检测误差较大等问题,提出育秧育苗智能播种检测技术从检测漏播到其他种子生化性质、预测育秧育苗产量的发展趋势,为构建基于高光谱技术智能育秧播种性能检测相关技术的发展提供重要的决策依据和借鉴意义。

关键词:光电检测;电容检测;视觉检测;播种性能;品质检测

中图分类号:S24 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-7217(2025)04-0091-12

邹学杰, 刘大为, 秦锋, 李旭, 徐新明, 龚明. 工厂化育秧育苗智能播种性能检测技术应用现状与趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(4): 91－102

ZOU Xuejie, LIU Dawei, QIN Feng, LI Xu, XU Xinming, GONG Ming. Application status and trend of intelligent sowing performance detection technology in factory-based seedling raising [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(4): 91－102

0 引言

我国是农业大国,以经济作物和粮食作物为主[1]。在农业生产中,育秧育苗播种是生产过程中至关重要的环节之一,其直接影响着农作物产量。随着工厂化育秧育苗智能播种检测技术的推广和应用,可提升作物出苗和作物单产水平[2]。在播种过程中,采用智能播种检测技术进行实时监测。一旦检测到漏播情况,即可立即启动补种机构进行修正,有效降低漏播和播种不均匀的可能性。智能播种检测利用多种传感器对播种机的排种质量和运行状态进行监测,包括光电、电容、超声波、雷达、压电和视觉传感器等。随着农业信息化技术的发展,播种作业越来越注重高效率、高质量和低损耗。现阶段育秧方式主要有田间育秧和工厂化育秧两种[3],其中工厂化育秧流水线是机械化育秧的主要形式[4]。主要由供盘、铺床土、压穴、淋水、播种、覆土等环节组成[5],播种是育秧流水线的关键环节[6],因此开发一套高效率、成本低、易上手的育秧智能化播种检测技术,对促进了农作物全生长周期高质量发展具有重要作用[7]。

现有研究主要集中在传统的光电式、电容式传感器检测,视觉检测,对于超声波、雷达传感器研究较少,

收稿日期:2024-01-22 修回日期:2024-06-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFD1000305-4);国家留学基金管理委员会资助项目(202308430207);湖南省教育厅科学研究项目(21A0131);湖南省教育厅科学研究项目(22B0186)

第一作者:邹学杰,男,1999年生,湖南祁东人,硕士研究生;研究方向为农业机械技术及智能装备。E-mail: zxj15200516360@163.com

*通信作者:刘大为,男,1983年生,湖南益阳人,博士,副教授;研究方向为农业机械设计理论及装备。E-mail: liudawei8361@163.com

而将高光谱技术应用于育秧育苗播种检测更少,为保障粮食生产稳定发展,南方地区鼓励种粮大户建设集中育秧设施,但如何提高育秧成活率、育秧质量已然成为当下研究重点[8],根据国家统计局数据显示,2023 年全国粮食总产量 695 410 kt[9],从我国目前发展来看,人口老龄化不断加剧,居民食品消费结构升级带动粮食需求持续增长,粮食供求紧平衡态势将长期存在,在未来一段时期,仍然需进一步提升粮食产能,有效保障国家粮食安全。育秧智能化提质增产势在必行,在此基础上,提出高光谱技术引入播种检测,为播种检测提出新解决方案,在春耕生产抢农时过程中,缩短育秧育苗时间,保障工厂化高质量育秧育苗。

1 播种均匀度检测

播种检测是种子播种后对播种质量和播种效果进行检测的过程。其主要目的是检测育秧播种空穴率、均匀度、合格率、重播率、平均粒数,评估播种质量并及时发现漏播或排种不均等问题[10]。通过播种检测,可以及时采取补救措施,保证播种的成功率和作物产量。

1.1 光电检测法

光电传感器技术是一种基于光电转换原理的传感技术,用于检测光线的存在、亮度、位置、颜色等特征。它将光信号转换为电信号,从而实现对光的检测和测量。

如图 1 所示,光电传感器一般由发送单元、接收单元和测量电路、显示单元组成,其操作原理是发送器发射光束,由接收器接收。在排种过程中,种子通过阻挡光束,导致接收器两端电压信号的变化,并对电压信号差加以处理,通过控制器对脉冲信号分析和处理,达到对排种器性能检测的目的[11]。研究人员一般在检测指标、重漏播检测、高尘环境检测精度改进 3 个方面进行研究,一般适用于大豆、玉米等大颗粒作物。

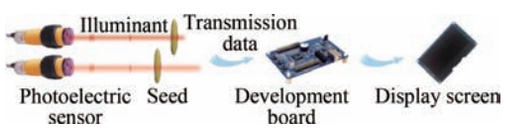


图 1 光电检测示意图

Figure 1 Schematic diagram of photoelectric detection

由于传统的重播检测通过光电传感器检测重漏播情况存在检测粒数限制、检测方式有待优化、精度差成本高昂等问题,赵立业[12]通过重新改造检测传感器的结构,可实现对双粒种子同步检测。李旭等[13]利用种粒对光线阻碍作用,将种子流动信号转为电信号处理,实时监测电信号变化,进行漏播检测。张炫炫等[14]设计一套光电脉冲信号监测系统,用于精确监控排种器的播种性能,该系统在 3~8 km/h 的速度下,能够准确监测排种量和播种粒距,平均准确率分别为 98.55% 和 2.84 cm。陈绍斌[15]在正常播种情况下,种子会有规律地落下,遮挡红外光束,使连续的红外光信号转化为电脉冲信号,然后通过单片机进行种子数量计算。丁幼春等[16]探讨了播种机故障监测和播种评价指标,确定多种模式下检测指标。印祥等[17]针对目前排种器性能检测试验台存在的成本高、检测精度差和检测不全面等问题,设计了可移动智能化排种器性能检测试验台,实现成本低、检测精度高等优点。

在作业环境中,光电传感器易受污染,其检测性能可能会受到影响,因为种子通常带有碎屑和其他残留物。研究人员致力于改善传感器的抗尘性能,以确保其在灰尘环境中的稳定性和可靠性。刘琳[18]设计了基于 51 单片机的光电传感器播种检测系统,功耗小、成本低,抗干扰能力强,但是对高尘环境敏感。梅鹤波等[19]在监测播种管时,利用光电传感器并采用模拟电压信号输出方式,虽然成功提升了传感器的抗尘性能,但种子检测的准确性并不高。纪超等[20]通过旋转式透明防尘罩自清洁除尘装置的设计,可以保护探头免受尘土侵蚀,在多尘作业环境中的检测精确度达到 98.1%。史智兴[21]研究使用可见光激光二极管(RLD)制作了排种均匀度检测的激光束栅格光电传感器,解决了检测种子覆盖率问题,并提高检测准确率。通过除尘机构的设计,可以有效提高光电传感器检测装置的精度。

国外研究者 AL-MALLAHI 等[22]通过使用光纤传感器估计谷物播种机中种子质量流量的传感系统,总体估计率约为 95%。KUMAR 等[23]基于间接入射薄型小轮廓封装的红外传感器用于检测排种器输种管中种子流量系统。GRIFT 等[24]研制了一种测量单个肥料颗粒速度矢量和尺寸的光学装置。ONAL 等[25]利用光学激光技术是测定种子间距分布的一种新方法,来检测行内种子间距分布精度。YAZGI 等[26]设计了一种基于 LED 可见光电传感技术和脉宽识别算法的排种器性能监测系统,在播种速度 8~9 km/h 范围内,棉花精密排种装置的合格播量监测精度、漏播量监测精度和补播量监测精度分别可达 98.75%、94.06% 和 91.30%。KARIMI 等[27]在红外种子传感器的基础上,构建了播种机监测系统,使播种性能信息可视化。

总体而言,国外大部分研究创新点在于利用光电传感器研究如何监测种子流量变化,种子间距以及监测信息可视化等,相较于国内研究者利用光学传感器检测种子漏播单粒或两粒情况,对于监测种子流研究时间长,更加接近于播种大流量实际作业情况。

1.2　电容检测法

电容检测法的原理是基于种子内部的电容变化。研究人员一般通过不同类型极板、信号处理以下方面进行研究，如图2所示，当种子在不同质量状态下，其内部的电容值会有所不同，可以通过电容值变化，监测种子的运动状况，具有高灵敏度和自动化特点。主要研究电容极板结构、检测电路优化两个方面开展研究。

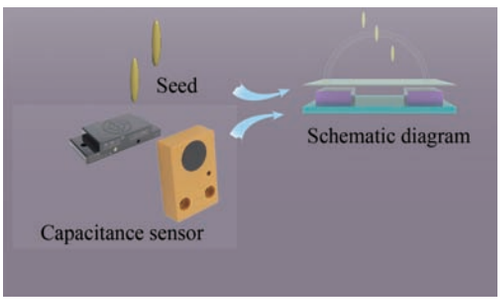


图2　电容传感器原理图

Figure 2　Capacitive sensor schematic diagram

任德良[28]设计了3种不同形状的电容结构，用于种子检测，发现E型交叉极板和差动式3级板电容传感器有效进行种子检测，但对置式结构检测效果不太理想。为进一步探究极板长度与安装位置对检测的影响，田雷[29]通过分析种子下落过程，发现安装4片E型极板的检测效果最佳，检测准确率达94%，由于在传统的电容检测技术中，当量程达到毫米级以上时，测量误差较大。

刘坤[30]为提高排种性能检测的精度，通过设计电容传感器极板结构、研究处理算法以及进行非线性校正补偿来实现，为进一步研究提供思路。郑银涛[31]为研究解决大量程检测的困难，发现非线性特征会导致较大量程下的测量误差。而王成江等[32]提出了利用高精度芯片采集种子经过电容传感器的电容变化量，但在高速播种下，会存在少量漏检情况，信号处理电路将电容传感器采集的模拟量转化为数字量，经过相应的逻辑分析得到检测结果。

在种子排种性能检测中，周利明等[33-34]采用了环形铜制电极板，发现误差相对较低。为提高排种性能检测的可靠性，研究人员设计了一种高精度的电容检测电路，并优化了电容脉冲积分算法，从而进一步提升了检测精度。这种装置结构简单、成本较低，适用于精确控制种子的播种过程。

综上分析，优化了E型、对置式和差动式3级极板检测结构，分析这3种极板电容式结构对播种检测的影响，研究人员除极板机构优化方面外，通过对接收信号的处理进行算法优化，从而降低了环境和信号干扰等问题，提升了检测精度和工作稳定性，减少了误差率。但由于电容传感器的输出是非线性的，因此在较大的量程内实现高精度的测量是困难的，这限制了它的应用范围。

1.3　视觉检测法

视觉检测技术是一种通过相机采集图像，并使用图像处理算法进行分析来检测、识别、分析和量化不同目标物的属性、特征、状态等信息的技术，如图3所示。

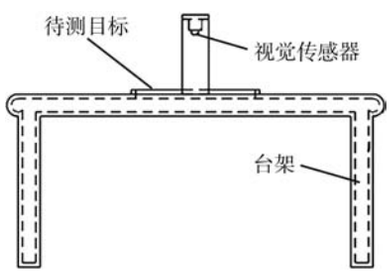


图3　视觉检测系统示意图

Figure 3　Schematic diagram of visual inspection system

在育秧播种领域中，视觉检测技术通常能够自动区分种子的颜色、大小、形态和质量等，从而对种子的被播数、偏离程度进行精确统计，并对作物生长状况进行实时监测和分析。此外，其他视觉检测系统还能够对作物的重量、形态、色彩进行自动化分析，为农民提供及时、准确的作物管理建议。因此，视觉检测技术不仅可以提高育秧播种的自动化水平，还可以有效地辅助农民进行作物管理和监测，从而提高作物的产量和品质。

国外研究主要针对漏播、种子流、种子下落速度等方面研究，DRAKE等[35]为了检测和分析播种器中种子落下时的运动情况，研究人员采用了高速摄像和图像处理技术。这一方法在提高排种器的性能上具有潜力，然而需要进一步研究以确定其准确性和稳定性。NATARAJAN等[36]研究集中在通过图像处理对种子在垂直方向的2维波动进行了分析。通过分析种子的运动特性，从而改善播种过程的控制和效率。NAGATA等[37]在图像处理技术的基础上，提出了实时检测自动育秧生产中漏播问题的解决方案。

MGANILWA等[38]采用了机器视觉检测移动秧盘内的漏播情况，有效定位漏播位置。KARAYEL等[39]通过高速摄像系统拍摄多张种子图片，分析种子之间的间距和速度，再分析种子运动过程。ZHANG等[40]用椭圆拟合的方法分割粘连的谷物及计数。MANGUS等[41]则通过结合电动种子监测系统和高速成像来分析播种机的播种准确性。LEEMANS等[42]设计一套视觉识别反馈闭环控制系统，可精确定位种子位置，反馈应用层显示检测效果。

国内研究者主要针对种子识别精准度,减少误差等问题,利用视觉传感器提高识别精度,为弥补光电传感器检测结果误差的缺陷。马旭等[43]通过开发一套种子检测系统,一定程度弥补光电传感器检测误差,但无法精准定位种子位置。胡少兴等[44]提出了一种基于神经网络的种子位置检测方法,为后续研究者提供基础。丁元法等[45]将图像处理技术应用于排种性能检测。然而,这些研究在处理种子运动时的图像效果方面存在一定局限性,安爱琴等[46]则结合高速摄像技术和图像处理方法对种子流进行拍摄、处理和特征提取,并计算排种器的性能指标,具有快速、准确的优势。齐龙等[47]利用深度学习实现检测秧盘是否空穴的情况,但秧盘运动速度对检测结果影响结果大。谭穗妍等[48]通过深度学习图像识别方法对图像进行优化处理,寻找最优方案处理实现秧盘图像中穴播量检测,赵郑斌等[49]通过设计一套在线监测软件可实现远程查看种子数量以及种子其他信息,为实现远程实时在线检测技术提供技术支撑。

针对检测精度问题,研究人员对播种检测精度优化。王辰星[50]发现育秧盘播种检测水平低、精度不高,提出图像处理检测水稻育秧盘播种质量的方法,发现漏播率、合格率、重播率和平均粒数的精度有所提高,但对于重叠种粒数的检测相对误差仍然较大。张俊雄等[51]研究运动的土槽台车搭载播种机,在土壤基质上进行播种,并利用机器视觉系统采集图像,实现播种检测,其绝对误差控制在4%以内。

赵郑斌等[52]提出了一种利用光电传感器和高速摄影技术相结合的方法来解决穴盘精密播种中的重播、漏播和不稳定性问题,并实现了高精准度的播种检测和可扩展性的参数设置。施龙[53]通过对播种器电机选型建立电机扭矩及其功率的参数模型,为播种电机的选型提供依据,提高了播种性能可靠性。赵鹏飞等[54]将图像技术与传感器融合的精量穴播器性能检测装置相比人工计数方式,运行稳定,能够有效实现数据采集与分析计算。

通过不同研究人员针对检测算法创新,贺智涛等[55]在种子图像使用级联滤波去除传送带上的杂质干扰。然后,采用3×3八方位方形结构元边缘检测算法获取种子的边缘。试验表明,该算法不仅能较好地提取种子的边缘,还能有效抑制噪声,但是无法实现闭环控制。董文浩[56]将自适应算法应用于播种检测装置,可实现实时采集播种图像,可实现定量精密播种。陈进等[57]采用机器视觉结合GABI算法,在LabVIEW和Matlab的支持下,实现了图像的采集、处理和结果展示。迭代阈值法用于分割图像,得到二值图像。视觉检测结果与人工检测的误差控制在5%左右。刘庆华等[58]提出了一种基于YOLOv7优化的水稻籽粒检测算法,解决了水稻籽粒小、检测速度慢、成本高等问题,改进后的YOLOv7模型的mAP@0.5达96.55%,满足了实时检测的要求。

2 秧/苗盘种子品质检测

高光谱技术是一种通过获取物体在数百个或数千个窄波段的光谱信息来获取影像的技术。传统的彩色图像中每个像素只包含3个颜色通道的信息,而高光谱技术可以提供更为详细的光谱信息。通过分析不同波段的光谱信息,高光谱技术可以用于目标识别、环境监测等领域。

在农业领域,可以利用高光谱技术对作物种子进行营养成分分析,获取深层信息。图4是高光谱成像系统组成。在高光谱成像系统的组成中,需要协调控制多个环节,包括光源功率、高光谱相机焦距、平台运动和图像采集等。同时,为了获得高精度的检测模型,需要开发和维护后续的数据分析模块。

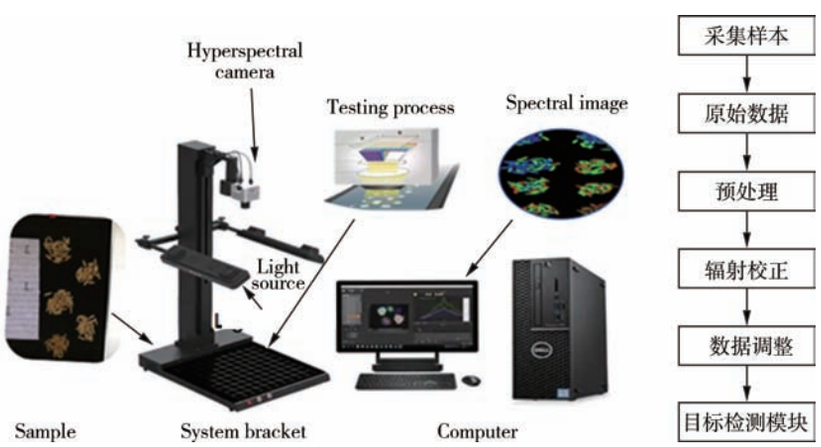


图4 高光谱检测技术系统流程示意图

Figure 4 Schematic diagram of the system components of hyperspectral detection technology

2.1　种子识别检测

通过利用高光谱技术结合深度学习，充分利用多维光谱数据，提高预测准确性和模型泛化能力。WENG等[59]使用高光谱成像技术获取高光谱图像，建立高光谱水稻品种鉴别模型，可实现准确率均高于90%。PANG等[60]通过改进2DCNN模型，检测种子活力的准确率可达99.96%。庄浩轩等[61]探究高光谱成像技术对种子分类的平均准确率可达96.14%。叶文超等[62]将光谱与图像数据融合建成二分支卷积神经网络模型，实现种子快速筛选，验证集识别准确率可达96.7%。

针对品种繁多，张伏等[63]添加极限学习机（ELM）鉴别模型，平均识别精准度控制在98.13%左右，较大程度解决品种鉴别问题。祝子涵[64]通过引入新深度学习算法，极大地提高了对于水稻品种鉴别能力，对于实时鉴定场景提供技术依据。LI等[65]通过高光谱技术和IResCNN模型，精准无损识别普通豆种子品种，准确率达93.06%。需优化小样本学习能力。ZHU等[66]结合高光谱成像与增量模型，利用LSSVM实现不同年份玉米种子分类，准确率达94.4%，需进一步提升对复杂数据集的适应能力。

ZHANG[67]等采用高光谱成像结合增量学习，提出RBF-BPR模型，有效解决玉米种子品种鉴定难题，无须访问旧数据，需优化泛化性能。MENG等[68]通过自注意力－1D-CNN模型结合高光谱技术，精确区分水稻品种，准确率达99.93%。须优化设备便携性与实际田间应用适配性。

叶梦媛[69]通过近红外和高光谱技术建立大豆种子活力无损检测模型，分类准确率高达95%。多品种模型分类准确率略有下降，仍在87%以上。吴静珠等[70]通过高光谱成像结合化学计量学方法，建立了小麦粗蛋白含量预测模型，相关系数为0.94，预测误差较小。李国厚等[71]通过基于注意力机制的混合卷积神经网络，结合高光谱成像技术，提升了小麦品种鉴别的准确性，分类准确率达97.92%。

吉劲茗[72]通过RGB图像和高光谱图像结合卷积神经网络，实现大豆品种的高效鉴别。GDNet在RGB图像分类中取得69.2%的准确率，而在高光谱数据处理后，多元散射校正优化模型的准确率为66.79%。王立国等[73]通过高光谱像素级信息与CNN结合，提出了一种玉米种子品种识别模型，实现了高效、无损的识别，识别精度达100%。

高光谱技术结合深度学习方法在种子活力和品种鉴别方面具有极高的准确性，平均可达到95%的分类准确率。这表明该技术在农业领域有巨大潜力，可以使种子识别和品种筛选更加高效。

2.2　育秧/苗品质预测

高光谱技术的农产品品质性状预测模型在许多方面取得了较好的预测结果，如淀粉含量、水分含量等。戴国新等[74]建立了基于高光谱的预测模型，可以准确估测精米直链淀粉和蛋白质含量。芦兵等[75]为探究水稻种子的水分含量，通过高光谱技术提高水稻良种筛选率。朱潘雨[76]为了检测种子的纯度和含水率，开发一套自动化检测系统。赵爽等[77]探究无损检测方式，获得最佳光谱参数，李美凌[78]通过高光谱技术结合PCA/ICA-SVM技术进行水稻无损检测是可行的。陈维君[79]试验发现水稻中含有四分之一水分含量时，是获取最佳稻米的关键。HEMAN等[80]采研究水稻水分含量预测大模型，可实现种子无损检测，但样品预处理要求较高、成本大。ZHU等[66]通过NIR高光谱成像和PLSR方法，精准评估冬小麦和大豆种子成分，实现育种材料质量分析，但性能提升有限，需优化低成本多光谱系统开发。PHAN等[81]通过深度学习与特征结合机器学习分类，精准鉴定水稻种子纯度，性能优于传统方法。

王超鹏[82]通过高光谱成像与机器视觉技术，准确检测玉米种子的含水率准确率97.8%、霉变准确率99.3%和破损准确率97.3%。王哲理[83]采用高光谱成像技术实现单粒玉米种子含水率和成熟度的无损检测，预测准确率分别达到92%和100%。朱潘雨[84]开发了基于高光谱图像的小麦种子纯度/含水量自动检测系统，准确率分别为96.5%和0.81%。王冬等[85]利用近红外光谱和高光谱成像技术，快速、无损地评估种子品质、活力、老化、纯度与真伪，提升检测效率和准确性。

通过高光谱技术来测定水稻中的水分、纯度含量是完全可行的。这些研究表明高光谱技术在农产品质量控制和品种筛选等方面具有巨大潜力。然而，仍然存在一些问题需要解决。

首先，不同农产品之间存在差异性，单一的预测模型可能无法适用于所有农产品。因此，需要针对不同农产品开展更多的研究，并建立相应的预测模型。高光谱技术的应用仍面临设备成本高和操作复杂等问题，限制了其在实际生产中的推广应用。因此，需要进一步降低设备成本，简化操作流程，提高技术的适用性和普及度[86]。

3　检测技术优缺对比

根据表1的内容，对现有的育秧播种检测技术进行了系统分析，综合总结了不同检测技术的优缺点及

其研究分支。在此基础上,论述了各类检测技术的适用对象,研究人员针对不同类型传感器在应用中的不足,提出了优化和改进方案,为明确各类检测技术的未来优化方向,提供参考方向。

表 1 检测方法优缺对比

Table 1 Comparison of the advantages and disadvantages of detection methods

技术名称	研究分支	适用对象	优点	缺点
光电检测技术	监测电信号变化	单粒水稻、大豆、玉米	可快速、实时检测种子	重播检测误差大
	抗灰尘光电检测	单粒水稻、大豆、玉米	抗灰尘效果显著	检测精度不够
电容式检测技术	不同极板结构	大豆、玉米、马铃薯	可快速测量种子的大小和形状,适用于大批量检测	受环境因素和种子材质影响大
	电容信号处理	大豆、玉米	种子重叠效果好	电容传感器受距离影响大
视觉检测技术	传统图像处理	单粒、多粒作物种子、水稻	对种子的形态、颜色等特征进行有效分析	受到光照和背景干扰大
	YOLO 目标检测算法	单、两粒种子	识别精度高、速度快、数量多、可实时检测	数据样本大、受环境条件影响大
高光谱技术	种子识别	适用作物广	获取种子的丰富光谱信息,可实现品种鉴别	数据量大、成本高
	品质预测	适用作物广	可以实现对种子的化学成分、品质等内部特征的深度分析	成本较高,需要专业设备和复杂的数据分析处理,对操作人员要求较高

4 现存的问题

1)环境条件要求高,数据误差大:利用高光谱技术进行播种检测时,需要设置光照室,对光线强度要求比较苛刻,需设置过渡箱,防止不同波段光谱信息干扰问题,高光谱传感器才能获取丰富的光谱信息,获取光谱信息后如何处理,需建立光谱特征模型算法来识别种子的重叠、漏播等情况,显示种子生化信息等关键参数,从而确保数据的可靠性和准确性。

2)实时性问题:工厂化育秧育苗需要实时监测和获取播种过程中的各项参数,在育秧流水线作业过程中,在确保数据不丢失情况下,满足工厂化育秧育苗高效快速要求,满足实际生产作业,需进一步大批量测试设备的数据即时可视化,将数据采集与反馈的速度提高,以实现更快速的检测能力。

5 总结与展望

5.1 总结

随着工厂化育秧育苗智能化播种性能检测技术的发展。这项技术的引入可弥补传统育秧播种检测方法的不足,提升育秧智能检测技术的精度、可靠性和智能化水平。传统的光电传感器检测受环境光、灰尘影响较大,而电容式传感器的检测距离对于检测结果影响较大,视觉传感器着重于图像识别算法优化以及图像噪点去除,针对种子表层信息获取,难以检测种子深层信息,使用高光谱技术分析种子形态、水分含量、成分信息提供参考依据,如何快速应用于工厂化育秧育苗快速检测,对高光谱数据的分析和处理是处理难点,结合计算机视觉算法,通过分析种子的高光谱特征,可以准确地测量播种率、均匀度、含水量、品质等级等关键指标,从而帮助农民了解和控制育秧育苗播种效果,优化种植策略,提高产量和质量。

5.2 展望

1)品种通用性:针对不同品种的光谱数据结合深度学习方法,开发更高精度、快速的检测算法模型,实现高精度的数据分析。

2)产量预测:工厂化育秧育苗朝着智能化方向发展,通过加大传感器融合应用,结合高光谱技术应用于工厂化育秧,为种植大户提供育秧育苗产量预测数据支撑。优化产量预估的预测模型,预测秧苗产量准确度,探索工厂化智慧育秧新态势。

3)育秧育苗数据信息化、可视化、标准化:随着水稻新品种的研发和种植技术的不断发展,以及AI信息技术的日新月异,水稻种植要求以精量播种、精量灌溉、精确施肥、综合防治等技术为核心的高产集成技术与信息传感技术相配套,通过育秧工厂数据分析,结合灾情、天气预测,可为农民提供了更准确的决策依据,能够及时发现和处理种植过程中的问题和异常,是保障秧苗质量高、成活率高,提高粮食产量的重要手段。

参 考 文 献

[1] 吴媛媛. 我国水稻生产现状及发展趋势[J]. 新农业，2018(7)：27－28.

[2] 农业农村部办公厅关于进一步做好机械化播种质量提升工作的通知[J]. 中华人民共和国农业农村部公报，2023(3)：84－86.

[3] 周太刚. 工厂化智能育秧关键技术[J]. 农业工程技术，2023，43(33)：22－23.

[4] 秦锋，刘大为，杨靖，等. 水稻机械化育秧播种机排种器研究现状及展望[J]. 现代农业装备，2024，45(1)：9－16.
QIN Feng，LIU Dawei，YANG Jing，et al. Research status and prospect of rice mechanized seedling sowing and discharging seeder [J]. Modern Agricultural Equipment，2024，45(1)：9－16.

[5] 唐兴隆，任桂英，李英奎，等. 优质水稻工厂化育秧关键技术研究[J]. 中国农机化学报，2019，40(6)：35－38.
TANG Xinglong，REN Guiying，LI Yingkui，et al. Research on key technology of high quality rice factory seedling [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2019，40(6)：35－38.

[6] 余立新. 浅析工厂化育秧技术流程与规范[J]. 南方农机，2018，49(15)：69－70.

[7] 翟培军. 水稻机械化栽植技术研究进展[J]. 南方农业，2019，13(8)：168－169.

[8] 农业农村部安排部署南方水稻集中育秧工作[J]. 中国农技推广，2023，39(4)：103.

[9] 王际娣. 13908.2亿斤！粮食总产量再创新高[J]. 小康，2024(2)：30－31.

[10] 王海江. 谈谈推广鉴定中单粒精密播种机播种均匀性的测量方法[J]. 农机质量与监督，2021(1)：22－24.

[11] 李润涛，王宪良，姚艳春，等. 播种机智能检测技术研究[J]. 中国农机化学报，2022，43(5)：93－101.
LI Runtao，WANG Xianliang，YAO Yanchun，et al. Research on intelligent detection technology of seed planter [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2022，43(5)：93－101.

[12] 赵立业. 精密排种器虚拟仪器检测系统研究[D]. 南京：南京农业大学，2003.
ZHAO Liye. Study on the test system of virtual instrumentation for precision seed-metering device [D]. Nanjing：Nanjing Agricultural University，2003.

[13] 李旭，刘大为，谢方平，等. 水稻芽种直播红外播量监控系统的研究[C]// 中国农业工程学会. 中国农业工程学会，2011年学术年会论文集. 湖南农业大学工学院，2011：4.

[14] 张炫炫，谭彧，张丽娜，等. 基于电机直驱的玉米勺轮排种器排种质量监测系统[J]. 中国农机化学报，2023，44(8)：155－161，190.
ZHANG Xianxuan，TAN Yu，ZHANG Lina，et al. Seed discharge quality monitoring system for corn spoon wheel seederbased on direct motor drive [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2023，44(8)：155－161，190.

[15] 陈绍斌. 精密播种机监测系统的研究与开发[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2007.
CHEN Shaobin. Study and exploitation on monitoring system for precision drill [D]. Yangling：Northwest A&F University，2007.

[16] 丁幼春，王凯阳，刘晓东，等. 中小粒径种子播种检测技术研究进展[J]. 农业工程学报，2021，37(8)：30－41.
DING Youchun，WANG Kaiyang，LIU Xiaodong，et al. Research progress of seeding detection technology for medium and small-size seeds [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2021，37(8)：30－41.

[17] 印祥，解春季，李玉环，等. 智能化排种器性能检测试验台研制[J]. 农机化研究，2018，40(2)：119－123.
YIN Xiang，XIE Chunji，LI Yuhuan，et al. Development of intelligent testing device for performance of seed metering device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2018，40(2)：119－123.

[18] 刘琳. 基于STC89C51单片机的播种性能检测系统研究[J]. 农业科技与装备，2023(2)：24－26.
LIU Lin. Research on seeding performance detection system based on STC89C51 SCM [J]. Agricultural Science and Technology Equipment，2023(2)：24－26.

[19] 梅鹤波，刘卉，付卫强，等. 小麦精量播种智能监测系统的设计与试验[J]. 农机化研究，2013，35(1)：68－72.
MEI Hebo，LIU Hui，FU Weiqiang，et al. The design and testing of the intelligent monitoring system for wheat precision sowing [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2013，35(1)：68－72.

[20] 纪超，陈学庚，陈金成，等. 玉米免耕精量播种机排种质量监测系统[J]. 农业机械学报，2016，47(8)：1－6.
JI Chao，CHEN Xuegeng，CHEN Jincheng，et al. Monitoring system for working performance of no-tillage corn precision seeder [J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(8)：1－6.

[21] 史智兴. 精播机排种性能检测系统及关键技术研究[D]. 北京：中国农业大学，2002.
SHI Zhixing. Research on detection system and key techniques for seeding quality of precision planter [D]. Beijing：China Agricultural University，2002.

[22] AL-MALLAHI A，KATAOKA T. Application of fibre sensor in grain drill to estimate seed flow under field operational conditions [J]. Computers and Electronics in Agriculture，2016，121：412－419.

[23] KUMAR R，RAHEMAN H. An embedded system for

detecting seed flow in the delivery tube of a seed drill [C]// International Conference on Advances in Chemical, 2015.

[24] GRIFT T, HOFSTEE J. Measurement of velocity and diameter of individual fertilizer particles by an optical method [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 66(3): 235-238.

[25] ONAL O, ÖNAL İ. Development of a computerized measurement system for in-row seed spacing accuracy [J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2009, 33(2): 99-109.

[26] YAZGI A, DEGIRMENCIOGLU A. Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit as function of the number of holes on vacuum plate [J]. Measurement, 2014, 56: 128-135.

[27] KARIMI H, NAVID H, BESHARATI B, et al. Assessing an infrared-based seed drill monitoring system under field operating conditions [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 543-551.

[28] 任德良. 电容式排种性能检测传感器试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
REN Deliang. Experimental research for capacitive-type sensor seeding performance detection [D]. Changchun: Jilin University, 2014.

[29] 田雷. 基于电容传感器的玉米精量播种机排种性能监测系统研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2018.
TIAN Lei. Research on the monitoring system of performance of corn precision seeder based on capacitive sensor seeding [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2018.

[30] 刘坤. 玉米精量播种装置排种性能电容法检测机理与方法研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019.
LIU Kun. Detection mechanism and method of seeding performance of corn precision seeding device based on capacitive method [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019.

[31] 郑银涛. 基于平板式电容的微位移测量系统设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
ZHENG Yintao. Design of parallel-plate capacitor based micro-displacement detecting system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.

[32] 王成江, 王关平, 杨森, 等. 基于电容传感漏播检测及记忆追赶式补偿的马铃薯精密排种系统设计与试验[J]. 林业机械与木工设备, 2023, 51(6): 69-75.
WANG Chengjiang, WANG Guanping, YANG Sen, et al. Design and experiment of potato precision seeding system based on capacitive sensor detection and memory catching-up compensation [J]. Forestry Machinery Woodworking Equipment, 2023, 51(6): 69-75.

[33] 周利明, 张小超. 基于电容测量的精密播种机监测系统研究[J]. 农机化研究, 2009, 31(11): 37-39.
ZHOU Liming, ZHANG Xiaochao. Monitor system of precision seeder based on capacitive sensor [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31 (11): 37-39.

[34] 周利明, 王书茂, 张小超, 等. 基于电容信号的玉米播种机排种性能监测系统[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 16-21.
ZHOU Liming, WANG Shumao, ZHANG Xiaochao, et al. Seed monitoring system for corn planter based on capacitance signal [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(13): 16-21.

[35] DRAKE T G. Granular flow: Physical experiments and their implications for microstructural theories [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991, 225: 121-152.

[36] NATARAJAN V V R, HUNT M L, TAYLOR E D. Local measurements of velocity fluctuations and diffusion coefficients for a granular material flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1995, 304: 1-25.

[37] NAGATA M, WANG H, MGANILWA Z M, et al. Studies on seeding inspection system for plug seedling production factory (Part 1). Development of seed miss detection program [J]. Shita Journal, 1999, 11(1):1-9.

[38] MGANILWA Z M, NAGATA M, WANG H, et al. Studies on precision planting system for plug seedling production using machine vision (Part 2) supplemental seeding method using image processing [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2001.

[39] KARAYEL D, WIESEHOFF M, ÖZMERZI A, et al. Laboratory measurement of seed drill seed spacing and velocity of fall of seeds using high-speed camera system [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 50(2): 89-96.

[40] ZHANG G, JAYAS D S, WHITE N D G. Separation of touching grain kernels in an image by ellipse fitting algorithm [J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(2): 135-142.

[41] MANGUS D L, SHARDA A, FLIPPO D, et al. Development of high-speed camera hardware and software package to evaluate real-time electric seed meter accuracy of a variable rate planter [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142: 314-325.

[42] LEEMANS V, DESTAIN M F. A computer-vision based precision seed drill guidance assistance [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 59(1-2): 1-12.

[43] 马旭, 王剑平, 胡少兴, 等. 用图像处理技术检测精密排种器性能[J]. 农业机械学报, 2001(4): 34-37.
MA Xu, WANG Jianping, HU Shaoxing, et al. Detection

of a precision seedmeter performance using imageprocessing technology [J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001(4): 34－37.

[44] 胡少兴，马成林，张爱武. 排种器性能检测中种子位置智能检测方法[J]. 农业机械学报，2001(3)：36－39.
HU Shaoxing, MA Chenglin, ZHANG Aiwu. An intelligent detecting method for seed position in performance detection of seedmeter [J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001(3): 36－39.

[45] 丁元法，张晓辉，赵洪林. 精密播种机性能试验的研究现状[J]. 山东农机，2002(4)：6－8.

[46] 安爱琴，王玉顺，王宏强，等. 基于机器视觉的精播排种器性能检测方法[J]. 农机化研究，2007(7)：48－50.
AN Aiqin, WANG Yushun, WANG Hongqiang, et al. Performance detecting method of a machine vision based on precision seedmeter [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2007(7): 48－50.

[47] 齐龙，马旭，周海波. 基于机器视觉的超级稻秧盘育秧播种空穴检测技术[J]. 农业工程学报，2009，25(2)：121－125.
QI Long, MA Xu, ZHOU Haibo. Seeding cavity detection in tray nursing seedlings of super rice based on computer vision technology [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 121－125.

[48] 谭穗妍，马旭，吴露露，等. 基于机器视觉和BP神经网络的超级杂交稻穴播量检测[J]. 农业工程学报，2014，30(21)：201－208.
TAN Suiyan, MA Xu, WU Lulu, et al. Estimation on hole seeding quantity of super hybrid rice based on machine vision and BP neural network [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(21): 201－208.

[49] 赵郑斌，王俊友，刘立晶，等. 穴盘育苗精密播种机的研究现状分析[J]. 农机化研究，2015，37(8)：1－5，25.
ZHAO Zhengbin, WANG Junyou, LIU Lijing, et al. Advance research of tray precision sowing equipment [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(8): 1－5, 25.

[50] 王辰星. 基于机器视觉的水稻育秧播种质量检测系统的研究[D]. 南京：南京农业大学，2009.
WANG Chenxing. Study on seeding quality detection system for nursery seeding of rice based on computer vision technology [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009.

[51] 张俊雄，马锃宏，李伟，等. 基于土壤基质的播种精度检测试验[J]. 农业机械学报，2012，43(12)：62－66，71.
ZHANG Junxiong, MA Zenghong, LI Wei, et al. Seeding accuracy test experiment based on soil substrate [J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 62－66, 71.

[52] 赵郑斌，刘昱程，刘忠军，等. 基于机器视觉的穴盘精密播种性能检测系统[J]. 农业机械学报，2014，45(S1)：24－28.
ZHAO Zhengbin, LIU Yucheng, LIU Zhongjun, et al. Performance detection system of tray precision seeder based on machine vision [J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(S1): 24－28.

[53] 施龙. 排种性能试验台的设计与试验[D]. 南京：南京农业大学，2015.
SHI Long. The design and test of the seeding performance test rig [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.

[54] 赵鹏飞，曹叶，王龙，等. 基于图像技术与传感器融合的精量穴播器性能检测装置设计与试验[J]. 塔里木大学学报，2020，32(4)：59－67.
ZHAO Pengfei, CAO Ye, WANG Long, et al. Design and experiment of precision hill planter performance detection device based on image technology and sensor fusion [J]. Journal of Tarim University, 2020, 32(4): 59－67.

[55] 贺智涛，王俊，毛鹏军，等. 数学形态学在种子图像边缘检测中的应用[J]. 湖北农业科学，2008(5)：587－589.
HE Zhitao, WANG Jun, MAO Pengjun, et al. Application of seed image edge detection with mathematical morphology [J]. Hubei Agricultural Science, 2008(5): 587－589.

[56] 董文浩. 基于嵌入式系统的机器视觉杂交稻智能恒量播种装置研究[D]. 广州：华南农业大学，2020.
DONG Wenhao. Research on machine vision hybrid rice intelligent constant seeding device based on embedded system [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020.

[57] 陈进，丁松，龚智强，等. 基于机器视觉和GABP算法的播种检测研究[J]. 测控技术，2017，36(9)：18－23.
CHEN Jin, DING Song, GONG Zhiqiang, et al. Research on prediction of seed number in the hole based on machine vision and GABP algorithm [J]. Measurement and Control Technology, 2017, 36(9): 18－23.

[58] 刘庆华，杨欣仪，接浩，等. 基于融合GhostNetV2的YOLO v7水稻籽粒检测[J]. 农业机械学报，2023，54(12)：253－260，299.
LIU Qinghua, YANG Xinyi, JIANG Hao, et al. YOLO v7 rice seed detection based on fusion GhostNetV2 [J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 253－260, 299.

[59] WENG S, TANG P, YUAN H, et al. Hyperspectral imaging for accurate determination of rice variety using a deep learning network with multi-feature fusion [J].

Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 234: 118237.

[60] PANG L, MEN S, YAN L, et al. Rapid vitality estimation and prediction of corn seeds based on spectra and images using deep learning and hyperspectral imaging techniques [J]. Ieee Access, 2020, 8: 123026-123036.

[61] 庄浩轩, 魏明生, 王波, 等. 基于高光谱成像技术的糯玉米种子分类研究[J]. 现代农业研究, 2024, 30(1): 51-57.
ZHANG Haoxuan, WEI Mingsheng, WANG Bo, et al. Classification of waxy corn seeds varieties based on hyperspectral imaging technology hyperspectral imaging technology [J]. Modern Agricultural Research, 2024, 30(1): 51-57.

[62] 叶文超, 罗水洋, 李金豪, 等. 近红外光谱与图像融合的杂交水稻种子分类方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(9): 2935-2941.
YE Wenchao, LUO Shuiyang, LI Jinhao, et al. Research on classification method of hybrid rice seeds based on the fusion of near-infrared spectra and image [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(9): 2935-2941.

[63] 张伏, 王新月, 崔夏华, 等. 高光谱结合极限学习机的玉米品种鉴别[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(9): 2928-2934.
ZHANG Fu, WANG Xinyue, CUI Xiahua, et al. Identification of maize varieties by hyperspectral combined with limit extreme learning machine [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(9): 2928-2934.

[64] 祝子涵. 基于神经网络的粳稻种子拉曼光谱鉴别方法研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2024.

[65] LI S, SUN L, JIN X, et al. Research on variety identification of common bean seeds based on hyperspectral and deep learning [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2025, 326: 125212.

[66] ZHU D, WANG K, ZHANG D, et al. Quality assessment of crop seeds by near-infrared hyperspectral imaging [J]. Sensor Letters, 2011, 9(3): 1144-1150.

[67] ZHANG L, WANG D, LIU J, et al. Vis-NIR hyperspectral imaging combined with incremental learning for open world maize seed varieties identification [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 199: 107153.

[68] MENG Y, YUAN W, AKTILEK E U, et al. Fine hyperspectral classification of rice varieties based on self-attention mechanism [J]. Ecological Informatics, 2023, 75: 102035.

[69] 叶梦媛. 基于近红外光谱和高光谱图像的大豆种子活力无损伤检测方法的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2022.
YE Mengyuan. Non-destructive measurement of soybean seed vigor based on near-infrared spectroscopy and hyperspectral images [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022.

[70] 吴静珠, 刘倩, 陈岩, 等. 高光谱技术检测单籽粒小麦粗蛋白含量探索[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S1): 134-138.
WU Jingzhu, LIU Qian, CHEN Yan, et al. Prediction method of single wheat grain protein content based on hyperspectral image [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(S1): 134-138.

[71] 李国厚, 李泽旭, 金松林, 等. 混合卷积神经网络用于高光谱小麦品种鉴别[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(3): 807-813.
LI Guohou, LI Zexu, JIN Songlin, et al. Mix convolutional neural networks for hyperspectral wheat variety discrimination [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(3): 807-813.

[72] 吉劲茗. 基于RGB和高光谱图像的大豆种子深度学习识别算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
JI Jinming. Research on deep learning recognition algorithm of soybean varieties based on RGB and hyperspectral images [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.

[73] 王立国, 王丽凤. 结合高光谱像素级信息和CNN的玉米种子品种识别模型[J]. 遥感学报, 2021, 25(11): 2234-2244.
WANG Liguo, WANG Lifeng. Variety recognition model of maize seed using hyperspectral pixel-level information combined neural network [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(11): 2234-2244.

[74] 戴国新, 陈国兴, 杨万能, 等. 基于高光谱的水稻精米品质参数测量技术研究[J]. 农业大数据学报, 2019, 1(2): 51-63.
DAI Guoxin, CHEN Guoxing, YANG Wanneng, et al. Mesurement of quality parameters of rice grain based on hyperspectral imaging on the visible-near infrared [J]. Journal of Agricultural Big Data, 2019, 1(2): 51-63.

[75] 芦兵, 孙俊, 杨宁, 等. 基于SAGA-SVR预测模型的水稻种子水分含量高光谱检测[J]. 南方农业学报, 2018, 49(11): 2342-2348.
LU Bing, SUN Jun, YANG Ning, et al. Hyperspectral detection for moisture in rice seeds by SAGA-SVR prediction model [J]. Southern Journal of Agriculture, 2018, 49(11): 2342-2348.

[76] 朱潘雨. 基于高光谱图像的小麦种子纯度/含水率检测系统研发[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
ZHU Panyu. Development of wheat seed purity/water content detection system based on hyperspectral images [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.

[77] 赵爽，宋京燕，陈国兴，等. 基于水稻种粒高光谱的品质性状预测方法[J]. 华中农业大学学报，2023，42(3)：211－219.
ZHAO Shuang，SONG Jingyan，CHEN Guoxing，et al. A method for predicting rice quality based on hyperspectral analysis of rice seed [J]. Journal of Huazhong Agricultural University，2023，42(3)：211－219.

[78] 李美凌. 基于高光谱的水稻种子活力检测技术研究[D]. 杭州：浙江农林大学，2015.
LI Meiling. Research on detection technology of rice seed vigor based on hyperspectroscopy [D]. Hangzhou：Zhejiang A&F University，2015.

[79] 陈维君. 水稻成熟度和收获时期的高光谱监测[D]. 杭州：浙江大学，2006.
CHEN Weijun. Rice maturation and harvest time monitoring by hyperspectral reflectance [D]. Hangzhou：Zhejiang University，2006.

[80] HEMAN A，HSIEH C L. Measurement of moisture content for rough rice by visible and near-infrared (NIR) spectroscopy [J]. Engineering in Agriculture，Environment and Food，2016，9(3)：280－290.

[81] PHAN T T H，VO Q T，NGUYEN H D . A novel method for identifying rice seed purity using hybrid machine learning algorithms [J]. Heliyon，2024，10(14)：e33941.

[82] 王超鹏. 基于机器视觉与光谱成像技术的玉米种子品质检测与分选[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2017.
WANG Chaopeng. Inspection and classification for the quality of maize seeds based on machine vision and spectral imaging technology [D]. Yangling：Northwest Agriculture and Forestry University，2017.

[83] 王哲理. 基于高光谱成像技术的玉米种子品质检测研究[D]. 石河子：石河子大学，2021.
WANG Zheli. Research on maize seed quality detection based on hyperspectral imaging technology [D]. Shihezi：Shihezi University，2021.

[84] 朱潘雨，方雯昕，黄敏，等. 基于高光谱图像的小麦种子纯度/含水量检测系统[J]. 计算机测量与控制，2023，31(4)：76－82.
ZHU Panyu，Fang Wenxin，HUANG Min，et al. Wheat seed purity or moisture content detection system based on hyperspectral images [J]. Computer Measurement & Control，2023，31(4)：76－82.

[85] 王冬，王坤，吴静珠，等. 基于光谱及成像技术的种子品质无损速测研究进展[J]. 光谱学与光谱分析，2021，41(1)：52－59.
WANG Dong，WANG Kun，WU Jingzhu，et al. Progress in research on rapid and non-destructive detection of seed quality based on spectroscopy and imaging technology [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis，2021，41(1)：52－59.

[86] 李世隆，许辰一，王楠，等. 基于BWO-ELM的水稻氮素无人机高光谱反演研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2024，5(3)：14－21.
LI Shilong，XU Chenyi，WANG Nan，et al. Research on rice nitrogen unmanned aerial vehicle hyperspectral inversion based on BWO-ELM [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization，2024，5(3)：14－21.

Application status and trend of intelligent sowing performance detection technology in factory-based seedling raising

ZOU Xuejie[1]，LIU Dawei[1, 2, 3, 4*]，QIN Feng[1, 2]，LI Xu[1, 2, 3, 4]，
XU Xinming[1, 2]，GONG Ming[3, 4]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*，*Hunan Agricultural University*，*Changsha* 410128，*China*；2. *Hunan Key Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery Equipment*，*Changsha* 410128，*China*；3. *Key Laboratory of Southern Intelligent Seedling*，*Ministry of Agriculture and Rural Affairs*，*Yiyang* 413055，*China*；4. *Hunan Research Center of Engineering Technology for Intelligent Seedling Equipment*，*Yiyang* 413055，*China*)

Abstract: With the development of agricultural science and technology，factory seedling nursery technology has gradually become an important part of modern agricultural production. The introduction of intelligent seeding detection technology significantly improves the efficiency and accuracy of the seedling nursery process and promotes the intelligent and automated

process of agricultural production. Intelligent seeding detection is the key to achieving efficient production of factory seedling nursery. Seeding detection technology has gradually changed from photoelectric detection and capacitive detection to visual detection combined with hyperspectral technology and other methods. The applicable objects of photoelectric detection, capacitance detection, visual detection, and hyperspectral detection technology methods are outlined, and the advantages and disadvantages of existing photoelectric, capacitance, and visual detection technologies are summarised. In photoelectric detection researchers generally study three aspects of detection indicators, heavy leakage detection, and improvement of detection accuracy in high dust environments, which are generally applicable to large grain crops such as soybeans, corn, etc. For capacitive detection, the main analysis of capacitance structure on seeding detection, in addition to the optimization aspects of the polar plate structure, algorithm optimization through signal processing to reduce environmental and signal interference, improve detection accuracy and work stability , reducing the error rate. For the visual detection of domestic and international research is mainly aimed at the leakage of seeding, seed flow, seed falling speed seed, detection algorithm model and deep learning algorithm innovation and other directions of research, for the traditional detection technology accuracy is not high, capacitance detection distance is far away from the problem of visual detection error, put forward the development trend of intelligent seeding detection technology for seedlings and nursery seedlings from detecting leakage of seeding to the other seed biochemical properties, and predicting the yield of seedlings and nursery seedlings, and so on. Provide important decision-making basis and reference significance for building the development of intelligent seedling sowing performance detection related technology based on hyperspectral technology.

Keywords: photoelectric detection; capacitive detection; visual detection; seeding performance; quality detection

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (2020YFD1000305-4); China Scholarship Council(202308430207); Hunan Provincial Education Department Scientific Research Project (21A0131); Hunan Provincial Education Department Research Project (22B0186)

First Author: ZOU Xuejie, E-mail: zxj15200516360@163.com

* **Correspondence Author:** LIU Dawei, E-mail: liudawei8361@163.com