

种子微创取样关键技术与装备研究进展

周鸣川^{1,2} 刘传杰¹ 郭祥雨¹ 舒庆尧^{2,3} 蒋焕煜^{1,4} 应义斌^{1,4}

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 浙江大学山东(临沂)现代农业研究院, 临沂 276000;
3. 浙江大学农业与生物技术学院, 杭州 310058; 4. 浙江省农业智能装备与机器人重点实验室, 杭州 310058)

摘要: 种子微创取样装备是面向生物育种技术中的种子切片取样环节, 基于机电控制、机器视觉等技术, 实现种子基因样本的全流程、自动化操作的智能化工具, 其推广和应用可有效提升种质资源培育的效率和质量, 助力种业振兴。本文首先介绍了种子切片检测的历史背景和装备研究现状, 随后将种子微创取样关键技术系统地划分为种子分离、位姿调整、夹持输送、取样和样品收集与清洁技术, 并对其研究现状和发展动态进行了阐述和剖析。在此基础上, 结合种子切片装备发展要求和应用场景, 归纳了种子切片取样装备面临的切割理论不足、多尺度通用性差、系统集成度有待提高等问题, 提出了未来发展方向为: 加强种子切片装备基础理论研究; 多尺度通用化种子切片平台开发; 发展全生产环节智慧取样检测系统。

关键词: 种子; 育种; 微创取样; 智能装备; 机器人显微操作

中图分类号: S237 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)07-0001-16 **OSID:** 

Research Progress on Key Technology and Equipment of Seed Micro-invasive Sampling

ZHOU Mingchuan^{1,2} LIU Chuanjie¹ GUO Xiangyu¹ SHU Qingyao^{2,3} JIANG Huanyu^{1,4} YING Yibin^{1,4}

(1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. Shandong (Linyi) Institute of Modern Agriculture, Zhejiang University, Linyi 276000, China

3. College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

4. Key Laboratory of Intelligent Equipment and Robotics for Agriculture of Zhejiang Province, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Seed micro-invasive sampling equipment is an intelligent tool designed for the seed slicing sampling process in biotechnological breeding. It utilizes technologies such as electromechanical control and machine vision to achieve a fully automated and comprehensive process for seed gene sampling. Its application and implementation effectively enhances the efficiency and quality of germplasm resource cultivation, thereby promoting the revitalization of the seed industry. To clarify the future development direction of seed minimally invasive sampling technology and equipment, a historical overview of seed slicing detection and the current research status of equipment was presented. Subsequently, the key technologies of seed micro-invasive sampling were systematically divided into seed separation, posture adjustment, clamping and transportation, sampling, and sample collection and cleaning technologies, which were systematically categorized and analyzed in terms of their research status and development trends. Building upon this foundation, combined with the development requirements and application scenarios of seed slice sampling equipment, insufficient cutting theory, limited multi-scale versatility, and system integration to be improved that seed slice sampling equipment faces were summarized and the future development direction was to strengthen the basic theoretical research of seed slicing equipment, develop a multi-scale universal seed slicing platform, and develop a smart sampling and detection system for the entire production process.

Key words: seed; breeding; micro-invasive sampling; intelligent equipment; micromanipulation robot

收稿日期: 2022-04-26 修回日期: 2022-05-15

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2022LZGC020)

作者简介: 周鸣川(1990—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事机器人微纳操作与农业机器人自主系统研究, E-mail: mczhou@zju.edu.cn

通信作者: 应义斌(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品品质与安全快速检测技术和机器人研究, E-mail: ybying@zju.edu.cn

0 引言

随着社会和经济的发展,我国对于农作物产品的需求快速增加,但是农作物产量无法跟上快速增长的需求,导致部分农作物缺口逐年加大,对国外进口依赖度持续攀升^[1]。从 2017 年到 2021 年,我国玉米进口依赖度从 1.29% 提升到 9.42%,小麦进口依赖度从 0.34% 骤升至 6.67%^[2-4],大豆进口依赖度常年 80% 以上^[5]。如何提升农作物产量,降低粮食进口依赖成为农业面临的严峻挑战。

种子被誉为农业的“芯片”,其中蕴含着植株性状信息,是提升农作物产量,破解我国农业发展面临的资源短缺和环境约束的关键^[6]。在分子生物学迅速发展的大背景下,育种已经从经验和大田实验统计为主的传统育种时代转向更为精准化、高效化、智能化的设计生物育种时代^[7-8]。基因样本提取作为设计生物育种的核心环节,其取样效率与质量会对后续基因检测、幼苗培育环节产生直接影响。传统种子样本提取主要依赖人工操作,存在取样强度大、切割一致性差等缺陷,制约了采样品质的进一步提高^[9]。种子切片装备是借助机器视觉、机器人等技术,将混沌的种子群经过种子分离、识别、运输、取样和样品存放工序依次实现样本精准采样、有序存放的全流程自动化操作,相较传统人工操作在效率和精度上都有显著提升。因此,着力开发快速、方便、精准的种子切片装备,实现在育种取样中对种子遗传信息的快速获取,是促进育种行业高质量发展的重要保障。当前,孟山都科技公司(Monsanto Technology LLC)、先锋高级育种公司(Pioneer Hi-Bred International, Inc.)等育种企业已研发出 The Mega Chipper 等规模化应用的种子切片机^[10-11],并基于此建立了完善的育种基因检测生产线,达到了降低育种成本与缩短周期的目标^[12-13],提升了其商业竞争力。国内对于种子切片装备的自主研发起步较晚、技术积累少,与国外相比技术上仍存在差距。

本文首先介绍国内外育种切片技术的历史背景和装备发展现状,进而对种子分离、位姿调整、夹持输送、取样、样品收集及清洁等技术方案的基本概况及存在问题进行阐述,最后结合种子切片装备研发的困难和挑战,提出展望和建议。

1 种子切片检测发展历程

19 世纪以来,随着对遗传学认知的深入,生命科学与生物技术的飞速发展,作物性状与遗传物质的内在联系逐渐显现,分子生物育种技术迅速发展和成熟^[14-15]。蛋白质组学(proteomics)、代谢组学

(metabolomics)、高通量测序技术(next-generation sequencing technology)、转录组学(transcriptomics)等一系列底层技术的研发,为分子层面育种提供了技术上的支持^[16];农作物遗传图谱的陆续绘制,为基因性状的筛选提供了理论参考^[17]。因此,基于低成本高通量测序的分子育种技术已逐步成为当今最有效的育种途径之一^[18-19],推动育种向精准化、高效化、智能化方向发展。

分子育种的测序环节通常需要将待测定的种子萌发并培养至幼苗阶段,对幼苗叶片的特定区域采集样品,随后送入实验室进行相关的提取和分析。根据基因检测所得到的结果,对样品进行溯源,找到对应植株并做出特定培养^[13]。植株在培养的过程中需要占用大量时间和场地,并且在育种群体中有 80% 以上的植株因基因型不符合预期需要丢弃^[9],造成了资源的浪费。

以小麦种子为例,其主要由种皮、胚乳和胚 3 部分组成(图 1),其中胚乳是由胚珠经过传粉受精形成,其基因型与植株自身基因型保持一致,只需要提取单粒种子的胚乳进行基因检测即可获知该种子的全部基因信息^[20]。因此,直接面向作物种子的无损切片基因样本提取可以节省大量的土地水肥资源,缩短育种检测周期^[21]。

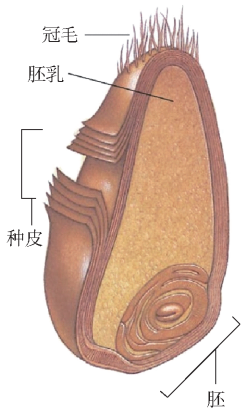


图 1 小麦种子结构图
Fig. 1 Wheat seed structure

早在 20 世纪 80 年代,就有研究人员开展了面向种子直接采样测序的研究^[22]。期间,研究人员采用手工直接切割、钻孔等方案获得组织样品粉末,进而检测其基因型。针对水稻、大豆等种子的样品检测数据均表明,其结果与萌发后植株的基因序列基本无异,基因型一致性达 99% 以上^[23-24],为种子切片检测的科学性提供了理论依据。

面向种子的众多取样方法中,半粒种子法是最简单,也是手工取样中最常用到的方法。其步骤是将种子的一部分斩断,没有胚芽的一侧粉碎后作为样品送检,有胚芽的一侧则标记并存储。若样品检

测结果为目标基因型,会将有胚芽的一侧挑选出来培养。

为了解半粒种子法切割后的种子活性情况,国内外学者分别对小麦、水稻、玉米、大豆等切割后的种子进行培养和观察^[23-30]。研究表明,切割后的种子生长和发育会存在一定程度延迟,但是存活率与正常种子基本无异,满足大田培育的要求。CHUNWONGSE 等^[26]就小麦种子半切后的发芽率变化进行了对照试验,结果表明,小麦半粒种子在 8 周后发芽率与完整种子相近,达到 85% 以上,若在种子萌发过程中添加适量杀菌剂可以减少种子伤口处真菌的污染,有助于半粒种子萌发率的提高(图 2a)。文献[31]将浸泡后的大豆种子子叶和胚乳处分别切取大约 5% 的组织,调查记录不同取样部位对种子发芽情况的影响。试验结果表明:与未处理的种子相比,微创取样后的种子发芽率虽然有所下降,但总体发芽率仍能达到 80% 以上,与未处理的种子的发芽率相近,且发芽率与种子胚乳切割点位无明显相关性(图 2b)。

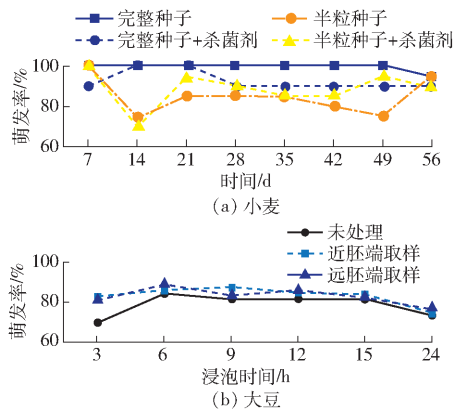


图 2 种子萌发率统计
Fig. 2 Statistics of seed germination rate

半粒种子法通常适用于粒径较长或体积较大、胚芽集中在一侧的种子,例如小麦、大麦、水稻,但是对于大豆等圆形种子,其外表光滑且不利于夹持,难以切割下样品;对于番茄种子,其胚胎呈螺旋形状,在对种子切割过程中难免损害到胚胎^[26]。基于此类情况,一些研究人员开展了钻孔法、刮取法等取样操作形式。

比如 VON POST 等^[32]使用直径为 1 mm 的钻头从干燥的大麦种子中钻孔,经检测种子提取样品与叶片提取样品的基因检测结果相近。MOTOKAZU 等^[33]用电钻在大豆子叶中央钻孔,钻孔后的大豆种子发芽率为 98%,可以正常生长。SUASTE-DZUL 等^[34]使用雕刻切割机在棉花种子钻取 2.4 mm 深的孔洞获取到 3.5 mg 子叶样品,钻孔后的种子发芽率可达到 98%。夏正俊等^[35]针对水稻、大豆和玉米

种子等作物钻孔取样时的钻头尺寸参数与获取到的样品质量进行统计,为钻孔工具的选型提供了参考。综上,使用钻孔工具在种子胚乳区域钻孔,可以避免对种子的胚轴造成伤害,每次可获得 3 ~ 30 mg 样品粉末,满足样本 DNA 总量的要求。这种方法解决了半切法种子难以彻底粉碎的问题,且取样形式更为灵活,对种子形态适应性广,取样位置、取样形状可控,减少了对种子的伤害。

2 种子切片装备研究进展

手工切片取样的方式存在耗时长、效率低、取样质量差等问题,不能满足高通量育种检测的需求,在分子育种规模快速增长的背景下,迫切需要研发自动化种子切片装备。

国外种子切片装备起步较早,21 世纪初,先锋高级育种公司和孟山都科技公司就开展了相关装备研发。2001 年,先锋高级育种公司率先在美国提出了自动化高通量种子样品处理方案^[36]。在此基础上,孟山都科技公司于 2003 年在加拿大递交了高通量自动化种子分析系统的专利申请^[37],这是世界上公布的第一款功能完善的种子切片装备。随后美国陶氏益农公司(Dow AgroSciences LLC)^[38]、先正达公司(Syngenta Participation Ag)^[39]、利马格兰欧洲公司(Limagrain Europe S. A.)^[40]、科迪华农业科技公司(Corteva Agriscience LLC)^[41]等育种企业也加入了研发的队列,种子切片装备的研究趋于白热化,各大育种企业争相占领技术高地。但是种子切片装备结构的复杂度高、集成难度大,样机的制造进展缓慢。

直到 2009 年在安大略省伍德斯托克举行的“Rural Coopavel”农场展上,孟山都科技公司首次对外展示了一款种子切片机(图 3a),该种子切片机可以快速准确地从单个种子上切下一小片样品,然后进行 DNA 分析^[42]。同年,孟山都科技公司在位于密苏里州圣路易斯的总部内展出了另一款种子切片机“The Mega Chipper”(图 3b),该切片机主要用于玉米和大豆种子切片以进行基因型测试^[11]。2012 年,孟山都科技公司在巴西举办的“Rural Coopavel 2012”展会上展示了与“INTACTA RR2 PRO”作物研发配套的种子取样系统(图 3c),该系统针对转基因大豆种子无损取样,缩短了作物育种周期^[43]。2013 年孟山都旗下的 DEKALB Asgrow Deltapine 公司展示了其 Breeding HQ 种子切片-基因检测实验室(图 3d,3e),该实验室实现了种子从取样、标记归纳、基因提取、检测再到幼苗培育全流程自动化操作,每年可检测超过 1 300 万粒玉米种子的基因^[44]。

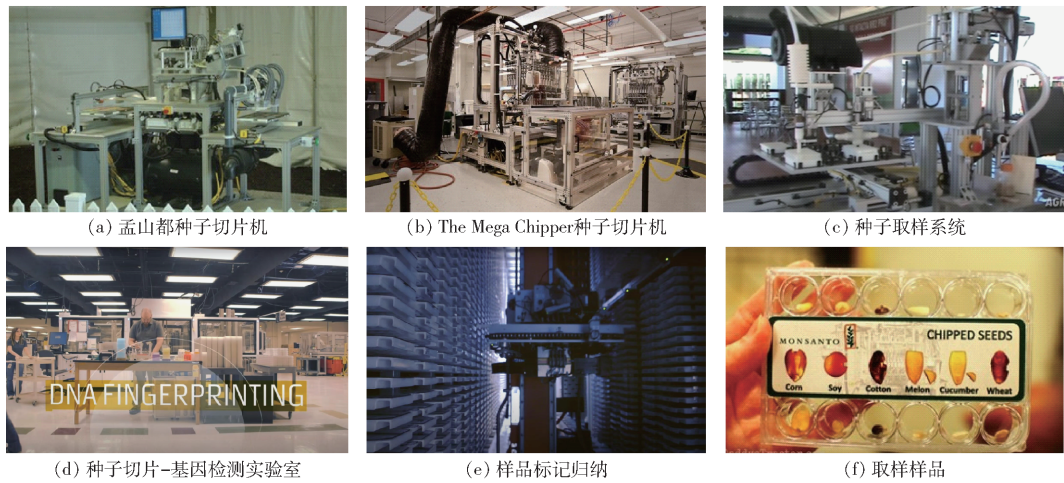


图 3 国外种子切片装备及其效果

Fig.3 Foreign seed slicing equipment and its effect

目前,孟山都公司已研制玉米、大豆、棉花、甜瓜等多种农作物种子的自动化取样装备,取样效果如图 3f 所示^[45],针对其它作物,如小麦、蔬菜的育种取样机也在研发当中^[42]。在种子切片装备的助力下,孟山都的育种材料检测效率从原先的 3~4 个月缩减至半个月以内^[12-13]。

虽然国外已有成熟的种子切片装备,但是其一直被种业巨头内部垄断,不对外提供任何技术服务和技术转让^[7],国内长时间面临无机可用的窘境,研发具有自主知识产权的种子切片装备至关重要。近些年,随着我国对育种技术的重视,种子切片装备的相关研发逐渐提上日程。

2013 年,中科院战略性先导专项“作物种子激光切割与 DNA 快速提取技术”,开启了我国种子取样装备研究,项目期间先后研制了“战略先导一代”、“战略先导二代”样机^[46](图 4a、4b),其采用机器人及相关控制技术设计了集种子精确送料、定位、分拣、存储于一体的自动化设备,实现对种子的精细定位及切削操作,日切削能力达到水稻 1 000 粒、小麦

2 000 粒、玉米/大豆 4 000 粒^[47]。2017 年第四届国际农业基因组大会上,中玉金标记公司公布了我国第一套商品化的种子切片机及挑选机(图 4c、4d),标志着我国分子育种在群体取样技术和目标种子挑选技术方面实现了突破。该机型每天可至少完成 4 000 粒种子切片取样,种子对照发苗率达 95% 以上^[48]。2021 年,福建建成作物全基因组选择育种创新平台,搭建出全国首台国产商业化水稻种子切片机与高通量基因分型设备(图 4e),建成了近 3 000 m² 的水稻表型自动采集设施,每天可自动采集 3 × 10⁴ 个水稻基因及生长情况的相关数据^[49]。2022 年,由浙江大学牵头的山东省重点研发计划“小尺寸异形种子高通量全自动微创取样关键技术研究及装备研发”获得立项^[50],团队提出了小尺寸异形种子取样解决方案(图 4f),该方案基于机械臂搭建 10 轴力控切片平台,可实现取样、存储、挑选于一体的全流程高效无损小麦种子取样。

综上,种子切片装备的研发已成为业界共识,但是微创切割、高通量样本输送等关键技术尚不够成

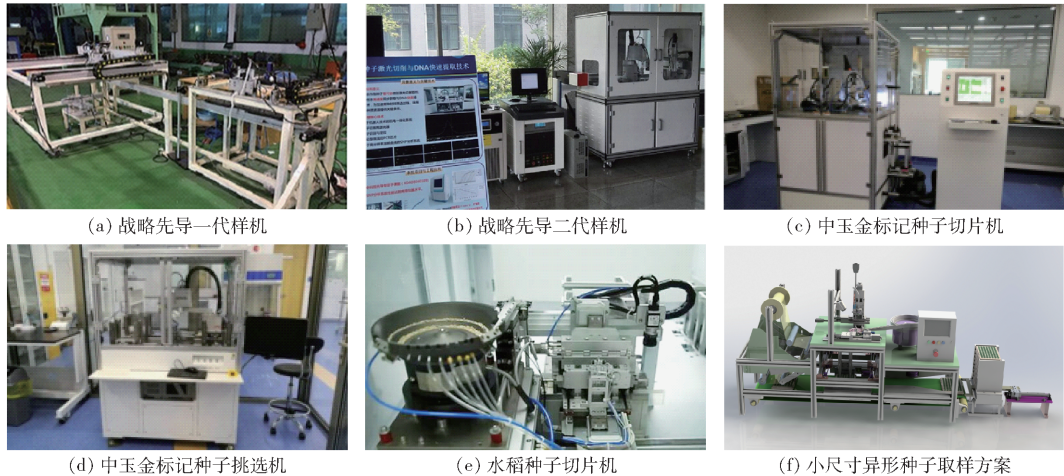


图 4 国内种子切片装备样机及方案

Fig.4 Domestic seed slicing equipment prototype and scheme

熟,造成取样精度差、样品纯度低等缺陷,限制了装备的市场推广和应用。

3 种子切片装备关键技术

按照工艺流程,种子切片装备的关键技术可分为种子分离、位姿调整、夹持输送、种子取样、样品收集等关键技术(图 5)。其基本工作原理为:通过种子分离技术将种子群体分离成均匀的单粒种子流,位姿调整技术对单粒种子的姿态进行识别,获取其外形和胚胎方向信息。随后,通过夹持输送技术应用机械臂将种子按照目标姿态送入取样技术的既定取样位点;取样完成后的种子母体和分离开的种子样品会由机械臂或其它物料输送机构放入样品收集装置中,控制系统存储样品及种子所在料盘序号及孔位坐标。

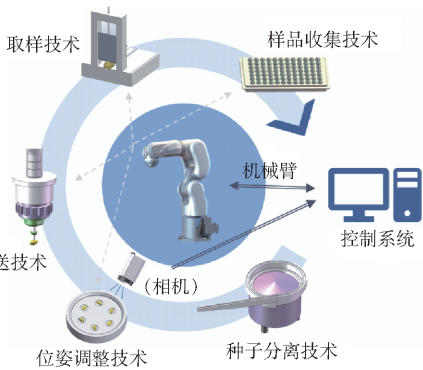


图 5 种子切片装备工艺流程

Fig. 5 Process flow of seed slicing equipment

3.1 种子分离技术

种子分离技术可以将零散、无规则的种子群转化为均匀连续的单粒种子,以便于姿态的识别和机械臂的精确抓取。常用的单粒化种子分离技术按照其分离原理可大致分为机械式分离、气力式分离、振动式分离。

3.1.1 机械式分离

机械式分离采用机械限位的方法获得所需种子流,主要包括充种、清种、投种等流程。充种环节使用槽穴等结构容纳一定数量的种子;清种过程则使用气流、毛刷等方式去除多余的种子,直至每个槽穴仅容纳一粒种子;投种过程会将取出的单粒种子投放至下一工序。文献[51]发明了一款分拣装置(图 6a),采用卧式圆盘的结构,在圆盘的圆周分布有充种缺口,而每个充种缺口恰好只可以容纳一颗种子,当充种缺口携带单粒种子旋转到投种口时,种子从充种缺口分离投出。该方案结构简单,但是通用性不足,多适用于大豆等外形规则的大颗粒种子。文献[52]发明的自动种子取样器(图 6b),使用活塞制动器进行取样。单粒化取种时,制动器驱动活

塞伸入种子的料斗内,提取出一粒种子,提取到的种子在气流下移动到料斗隔间,完成取种工作。

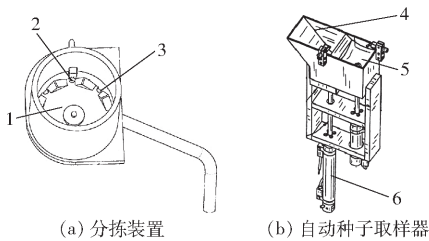


图 6 机械式分离典型结构图

Fig. 6 Typical structure of mechanical separation

1. 圆盘 2. 投种口 3. 充种缺口 4. 料斗 5. 料斗隔间 6. 制动器

3.1.2 气力式分离

气力式分离主要是利用真空泵产生的负压为动力源,实现单粒种子的拾取和分离。文献[53]在种子切片装备的种子分离阶段采用了分离轮结构(图 7a),分离轮沿周向均匀布置有真空气孔,分离轮转动时,真空气孔依次通过充种室,将单粒种子吸附并固定,随分离轮转动。当真空气孔转动到对侧的收集器时,气孔的负压停止,单粒种子释放。文献[54]在分离轮结构的进种口位置增加计数器,进一步实现了对种子数量进一步监测与调整。由于分离轮结构的多个真空气孔针共用负压源,真空气孔的负压无法独立调节,易产生漏吸、多吸等缺陷。针对此类问题,文献[55]发明了一款真空吸盘结构,通过单个吸盘负压的精准调控,真空吸盘在料筒中可恰好吸取一粒作物籽粒。为了实现对种子分离过程工作质量的监控,JAHNKE 等[56]在设计移动拾取装置的吸盘时,引入真空力反馈机制,吸嘴处压力传感器获取吸盘实时气压,通过设定压力阈值判断吸盘是否完成落料或堵塞(图 7b)。文献[57]将多个吸盘并联在同一个机械臂上工作,在保证吸取质量的前提下,其工作效率得到极大提升。综上,气力式分离减少了机械式分离过程中对种子的机械力,在降低种子潜在损伤的同时具备较高的效率和单粒化合格率。

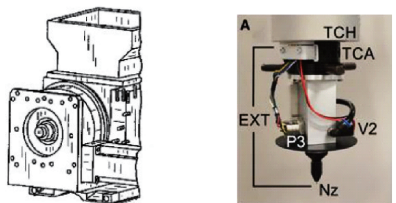


图 7 气力式分离典型结构图

Fig. 7 Typical structure diagrams of pneumatic separation

3.1.3 振动式分离

振动式分离单粒化机构通常采用电磁激振器或电磁铁作为振动源,种子在滑槽运动的过程中,杂乱

的种子堆会在振动力的作用下发生种子与种子、种子与滑槽间的相互作用,直至每粒种子都均匀平躺排列,达到其重心最低的状态。刘彩玲等^[58]研究的振动供种型孔轮式非圆种子精密排种器(图 8a),采用直线 V 型导槽,所容纳的种子会在振动力的作用下调整为“侧卧”姿态,而导槽上方的梳种针会将多余的种子清理,仅容纳单粒种子通过。研制的一种超级杂交稻压电振动式匀种装置(图 8b)^[59],使用压电振子对种盘施加高频振动,水稻种子在振动板表面导槽的约束下,逐渐形成单列稳定连续输送的种子流,具有结构简单、对种子损伤小、适应性强、工作效率高等优点。

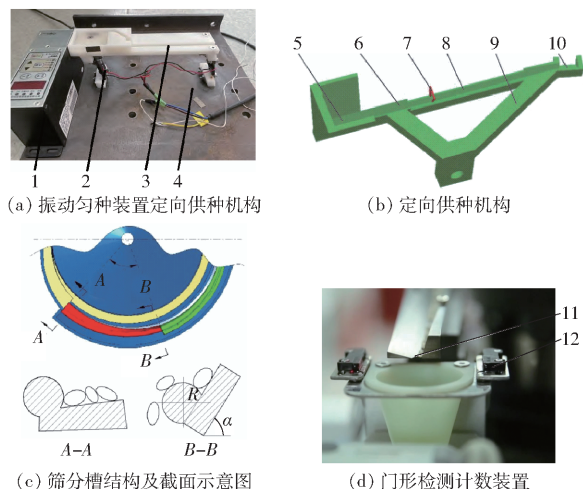


图 8 振动分离典型结构图

Fig. 8 Vibration separation typical structure

1. 电源驱动器 2. 压电振子 3. 振动板 4. 底座 5. 供种箱
6. 高边 V 型槽 7. 梳种针 8. 低边 V 型槽 9. 支架 10. 输出口
11. 出口口 12. 门形计数检测装置

导槽作为振动式分离的核心部件,起到引导种子均匀排序的作用。通常,导槽的长度越长,其出口处的种子排列质量越高。使用螺旋形的导槽代替直线导槽可以在单粒化机构保留较长导槽同时结构更为紧凑。黄小毛等^[60]设计了一种螺旋导槽式振动供种装置,主要由振动底座和料斗两部分组成。工作时,电磁振动器发生高频振动,种子沿导向槽缓慢移动。导向槽的结构为入口向出口逐渐收窄的喇叭状,收至槽口仅可容纳一粒稻种(图 8c),多余的种子在周期性高频扭摆振动的作用力下从槽口掉落,实现单粒排列,该排种器对多品种种子均有良好的适应性。为了对种子单粒化质量进行识别与分析,文献^[61]在螺旋供种装置的上方加装视觉相机,在出种口加装门形检测计数装置(图 8d)。视觉相机用于判断排种单粒化质量,若质量不合格,则种子槽内部的止挡条会将种子清回充种室;门形检测计数装置用于统计输种信息,控制器可以基于输种信

息对输种间隔与速度进行调节,供种精度进一步提高。

对于水稻、玉米等种子,由于其自身的形状以及物理特性,振动排种器亦可以在单粒化的同时实现种子朝向的初步定位,且精度较高,定位率可达到 89% 以上。常见的方法有基于重心定向、基于外形定向、基于摩擦特性定向等。

例如,玉米种子的重心不位于形状中心,在跌落时发生翻转的概率也不尽相同。在种子滑动路径设置合适尺寸的“台阶”,顺行的种子跌落保持原先姿态,逆行的种子翻转,从而实现方位的重新排布。王应彪等^[62]基于电磁振动设计的玉米种子定向排序输送装置(图 9a)顺行定向成功率为 93.5%,逆行定向成功率为 89.4%。张东兴等^[63]则是基于玉米种子的三角外形设计了判断种子朝向的复合式调向机构,复合式调向机构安装于振动排序装置的轨道中部,种胚朝向符合的种子通过,种胚朝向不符的种子则被动调整方向或重新掉落到种仓。试验表明该机构所选用马齿形玉米种子的胚面定向成功率均大于 91%(图 9b)。张斌等^[64]对水稻种子摩擦特性及其对振动的响应进行研究发现,水稻种子表面分布有由胚胎向种尖方向生长的种毛,其不同方向运动时所受的摩擦力具有各向异性,即粗糙的平面上沿种尖方向的摩擦力小于指向胚胎方向受到的摩擦力。在受激振力、重力和摩擦力的复合作用下,稻种会沿触点产生一定扭矩并发生转向,朝向摩擦力较小的种尖方向。基于该机理,开发了可以实现稻种沿其长轴按胚胎方向定向排列的供种装置,在振动试验台上测定定向排序成功率达 95% 以上(图 9c)。

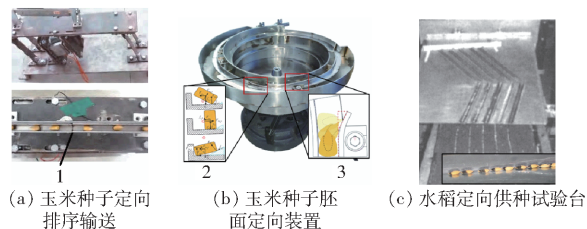


图 9 定向排序单粒化机构

Fig. 9 Directional sorting single granulation mechanism

1. 调向台阶 2. 胚面调向机构 3. 种尖方向调向机构

振动单粒化装置具有较高的精度,但是对作业条件的要求更高。如果环境中存在振动的干扰,会导致单粒化精度下降。因此其使用范围较为受限,需要安装在隔振良好的平台,且与易产生振动的机构有时间上或空间上的间隔。

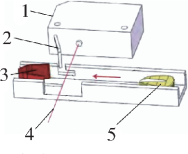
3.2 位姿调整技术

如何避免胚的机械损伤,保证种子在取样后顺

利萌发是种子取样装备设计的核心与难点。借助位姿调整技术,可以使取样工具避开种胚的位置从而提高取样效率以及保证取样后种子的活性。种子因基因和生长环境的差异,每粒种子的尺寸与形状都存在区别,因此种子的姿态调整具有一定的难度。位姿调整技术的研究集中在两个方向,一是机械调整,即通过机械结构(例如型孔或仿形槽)实现种子

按照单一或某种特定形式的朝向均匀排列,表 1 展示了机械调整典型技术原理及特点。另一个方向是视觉反馈控制法,基于图像识别技术获取种子的形态、颜色、纹理等特征并借助计算机完成种子的姿态估计,将种子姿态信息反馈给控制器驱动机械结构完成种子姿态的调整,实现机器视觉技术与自动化操作的精准对接。

表 1 机械调整法典型技术原理与特点
Tab. 1 Typical technical principles of mechanical adjustment method

方式	示意图	原理	特点	文献序号
基于型孔限位		符合定向特性的玉米种子会完全充入型孔中,不符合定向特征的玉米种子或者多余的种子无法完全充入型孔中,经过清种区时在重力作用下滑出型孔	对于种子的外形均匀性要求较高,且该方法仅适用于异形种子,适用范围窄	[65]
基于激光传感器定向		当玉米种子以尖端向前的姿态运动时,种子可以进入仿形种槽中,激光传感器会接收到激光;当种子以其余姿态(如尖端横向、反向)运动时,种子无法进入仿形种槽,激光被遮挡,剔针将该种子剔除或者翻转	精度高,尖端识别率达到 99% 以上,但是对种子外形有特异性要求,且调整效率低,常用于种子初步定向后的后处理工序	[66]

视觉反馈控制法是以视觉技术为基础,配合自动化操作完成种子姿态调整的方法。通过实时识别种子的姿态,调整机械臂的末端执行机构,完成种子姿态角度的闭环控制,从而保证较高的姿态调整精度。视觉控制法以图像识别为核心,即快速准确地识别出种子的特征轮廓,进而解算其姿态,因而具有适用场景广、抗干扰能力强等优势。经过研究人员的不断积累与探索,已凭借其精准高效的优势在小麦、水稻、玉米等作物中广泛应用。

图 10 展示了视觉控制法在图像识别环节的整体分类。按照成像设备类型,分为可见光成像、雷达成像、激光成像、红外成像、X-射线数字成像、X-射线 CT 成像等。雷达成像和激光成像主要用于外部三维形态的直接获取,受技术水平限制,存在分辨力偏低、耗时长等缺点,在毫米尺度成像的应用较少。由于可见光成像、雷达成像和激光成像等技术受限于提取种子表层颜色及轮廓特征,更深层次的内部组织分布无法解析。X-射线数字成像、X-射线 CT 成像等可以根据种子内部密度分布判断空间内胚的位置,对种子胚的无损取样有重要指导意义。由于 X-射线传感器安装改造过程繁琐复杂、测量不连续,限制了其近些年的研究应用和推广。表 2 总结了国内外种子成像研究成果,从表中可以看出,可见光成像是当今使用最普遍的方法,通过种子的二维可见光图像,基于特征点算法可以快速获取种子位置姿态等信息。

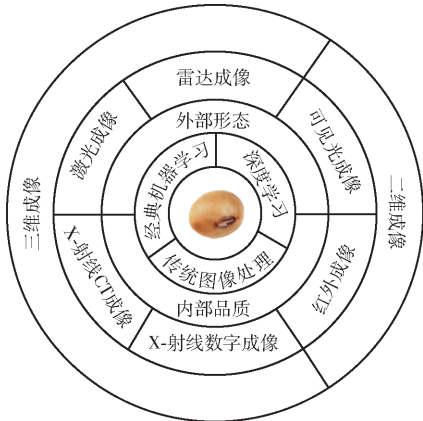


图 10 图像识别分类

Fig. 10 Classification of image recognition methods

传统图像处理可以对图像进行颜色通道二值化、灰度化、分离颜色通道、阈值分割等处理,从而得到所需特征区域并获取所需信息^[75]。经典机器学习起源于 20 世纪中期^[76],是通过计算机算法来学习数据中包含的内在规律和信息,从而获得新的经验和知识^[77],发掘出高维数据背后隐藏的统计规律^[78]。深度学习则是近年来由机器学习发展而来,作为数据中学习表示的一种新方法,强调从连续的深度网络模型中进行学习,相较于经典机器学习在分类预测的准确率、精确率、召回率有一定提升^[79]。表 3 总结了种子姿态识别的研究进展。

3.3 夹持输送技术

种子经位姿调整之后,为保证微创取样的准确性,需要将种子可靠夹持并准确输送到指定工作台

表 2 国内外种子成像技术研究成果

Tab.2 Research on seed imaging technology at home and abroad

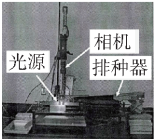
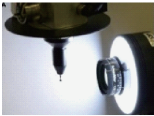
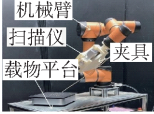
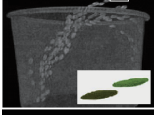
成像方式	示意图	维度	原理与功能	文献序号
可见光成像		二维	使用线阵列相机对脱粒稻穗以及谷粒的图像进行采集,再结合深度学习、神经网络的算法获取总粒数、实粒数、粒长、粒宽	[67 – 69]
		三维	将种子旋转并间隔一定角度获取二维图像,直至图像覆盖种子所有方位。随后借助三维重建算法实现对每一粒种子的 3D 成像并使用椭球体对种子外轮廓拟合,求得其三轴尺寸(长度、宽度和高度)	[56,70]
结构光(激光)成像		三维	利用结构光扫描仪获取作物籽粒的三维点云数据并使用点云处理算法提取水稻和小麦的籽粒三维表型参数	[71]
多光谱表型成像		二维	种箱中的种子均匀掉落在传送带上运输,利用多光谱成像仪在输送带上方对产品进行扫描,测量种子尺寸、颜色、形状等特性	[72]
X-射线 CT 成像		三维	基于 CT 对谷穗进行扫描,通过系统集成的三维重建算法对谷穗分割和重建,获得谷粒的尺寸参数	[73]
显微 CT 成像		三维	采用显微 CT 技术对批量种子进行扫描,开发滤波反投影算法进行种子三维重建,可获得种子体积、形态和密度特征	[74]

表 3 种子姿态识别研究进展

Tab.3 Typical seed attitude recognition methods

类型	方法	原理	研究对象	性能参数	文献序号
经典图像处理	边界曲率	检测种子边界的曲率来判断玉米种子尖端的位置	玉米	成功率 92.50%	[80]
	轮廓拟合	通过 Ra-mer 算法拟合种子轮廓,使用圆弧对生成的多边形轮廓进行拟合,拟合半径最小的部分即为种子的尖端位置	君迁子	成功率 83.6%	[81]
	Harris 尖端识别算法	利用籽粒尖端形态结构特征,设计了基于 Harris 角检测的尖端识别算法,查找角度特征以判断籽粒尖端位置	玉米、南瓜和西葫芦	成功率 95.6%	[82]
	逐行扫描、面积比较	采用逐行扫描的方法确定种子长轴方向的上下边界点,以上下边界点为基准绘制两个相同的尺寸矩形,对两个矩形内种子的面积进行比较,面积小的一端为种子发芽口所在位置,从而获得种子朝向	南瓜	成功率 97.1%	[83]
	面积和占空比	设计了姿态识别算法,使用面积和占空比估测种子平躺或侧卧的姿态	玉米	成功率 90.17%	[84]
	颜色模型	根据 HSI 颜色模型的数值查找种子区域,然后判定其几何特征	葫芦科蔬菜	成功率 95%	[85]
	广度优先搜索	使用广度优先搜索(Breadth-first search)思想对 Log 算子边缘检测算法进行优化,完成对种脐、种肾的识别	大豆	成功率约 90%	[86]
	轮廓距离算法	根据颜色区域绘制胚乳轮廓并确定形心坐标,基于轮廓与形心距离确定种子尖端朝向	玉米	成功率 99%,角度检测偏差小于 8°	[87]
传统机器学习	神经网络模式识别	使用 Matlab 神经网络模式识别工具箱,以种子的部分特征参数作为神经网络输入,手动标记测量种子姿态作为网络输出,建立模型并对模型进行训练,训练完成的模型用于种子姿态识别	玉米	成功率 99.4%	[88]
	LDA、KNN	使用线性判别分析(LDA)算法和 K 最近邻法(KNN)确定玉米籽粒的长轴方向、大端的 2 个外凸圆角切割线位置	玉米	成功率 99%	[89]
深度学习	语义分割、SWPR、连通域提取运算	结合语义分割、带推荐区域的移动滑窗(SWPR)和连通域提取运算实现种子分割与种子像素区域计算,可快速完成图像中种子个体层面的形态参数统计	小麦	分割交并比大于 0.97	[90]
	BP 冲量算法	采用 BP 冲量算法建立 3 层前馈神经网络,可以识别籽粒的轮廓特征	玉米	成功率 93%	[91]

上。由于种子体积小,形状各异,且易遭受机械损伤,如何提升夹持输送的效率和质量是需要重点考虑的问题。

为解决上述问题,早期学者们尝试使用往复或回转运动机构来实现种子的夹持与输送。孟山都公司^[92]设计了一种自动无污染种子取样器(图 11a),它由种子保持器提供的压缩力固定种子,通过圆盘回转运动将种子输送至预定取样位置,随后机械手爪插入种子保持器并向两边扩张,种子不再受到压缩力而释放。这是自动化种子夹持输送机构的雏形,适合流水线式作业。在此基础上,先锋公司对夹持和输送的结构做出改进(图 11b),其采用负压将定向后的种子夹持,随后种子随输种滚筒旋转输送到切割位点。得益于多机构并联工作,其工作效率进一步提升^[93],但是夹持可靠性低、

输送成功率偏低的缺陷没有得到解决。

随着数字化、自动化等相关技术的快速发展,机器人平台不断成熟并在生产中推广普及,众多学者将机器人系统引入到种子夹持与输送环节当中,提高了输送的效率和精准性。

文献[57]基于直线式三轴机械臂实现了取种、运输至切割台再运动到种盘落料的全流程操作。针对直线式三轴机械臂动作范围相对较小,设备空间因数较低的问题,文献[94]使用 SCARA 四轴水平关节机械臂,基于视觉伺服技术对机械臂抓取与搬运轨迹矫正,提高了种子输送精度。文献[95]设计了双臂协同运动的机器人系统,当种子完成切割后,两个机械臂分别抓取种子母体和切下的样品放入对应编号的容器内,该方案抓取可靠,样品不易发生丢失,但多机械臂协同运动控制会提高系统复杂度。

机械手爪作为机械臂的末端执行机构,决定了夹持的可靠性。常见的微型手爪结构有二指机械手爪、三指机械手爪、负压式手爪、液滴机械手爪等,如表 4 所示。由于种子体积普遍微小,传统的机械手爪已很难准确可靠夹持单粒种子,因此需要对机械臂末端手爪的结构升级优化,增加抓取稳固性,同时减少对种子的机械损伤。国内科研团队纷纷展开技术攻关,针对种子等小粒径物料的特性研究出多种手爪结构。

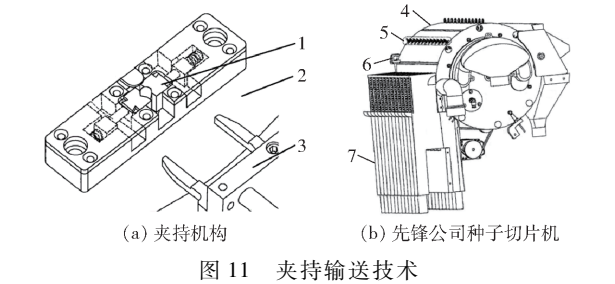


图 11 夹持输送技术

Fig. 11 Clamping and conveying technology

1. 种子保持器 2. 圆盘 3. 机械手爪 4. 输种滚筒 5. 种子

6. 激光切除装置 7. 收集槽

表 4 适用于微小物料的手爪典型结构

Tab. 4 Typical structure of gripper for small materials

方式	示意图	原理	特点	文献序号
二指机械手爪		电机或气泵驱动夹爪做开合往复运动,夹爪闭合时,将种子两侧施加夹紧力,在摩擦力作用下将其提起	结构简单、成本低、制造技术成熟,但是其夹取可靠性差	[96]
三指机械手爪		电机或气泵驱动三指夹爪做开合往复运动,原理同上	同时使用 3 根手指来握持,适用性更广且握持的稳定性更高	[97]
负压式手爪		播种头进气口接通负压气源,将种子吸附住;播种头切断负压气源,种子受自身重力作用脱离吸嘴掉落	吸附稳固、中途不易掉落,对多尺寸、多形态种子都有良好适应性	[98]
液滴机械手爪		利用液滴的表面张力实现对操作对象的拾取,再通过改变其钨丝棒的上下高度实现对操作对象姿态的调整,最后利用液桥形态变化来改变物体所受液桥力大小实现操作对象的释放	柔性接触,对操作对象的几何形状没有任何限制,适用范围广以及表面无损伤;可实现操作对象在三维空间内的任意位姿调整	[99]

针对传统二指机械手爪对于不规则物体夹持可靠度差、易损伤等缺点,方海峰等^[100]基于仿生学原理设计了仿鸟喙软体二指机械手爪,手爪为由外至内锥形空腔的结构,在充入一定量的正压后,两指尖能像剪刀状张开,反之,在充入一定量的负压后实现

指尖的闭合,从而完成整个抓取动作。该结构对于体积较小且形状不规则的物料具有良好的适应性。彭瀚旻等^[97]使用 IPMC 薄膜材料设计了一款三指微型柔性手爪,在 IPMC 薄膜表面施加低电压后,其材料基体会发生大变形,驱动手爪收缩。当材料基

体电压为零时手爪张开,该技术解决了传统三指机械手爪传动链复杂、微型化程度低等缺陷。对抓取力进行监控是预防抓取损伤的有效手段,为此研究人员开展了力敏微型机械手^[102]、二维力反馈机械手夹持器^[103]等研究,对抓取力和沿机械手轴向的压力的监控,实现了手爪基于力比例控制实时调整,进而保证物体与手爪之间不发生相对滑动。负压式手爪在微小农业物料的输送中亦有广泛应用,其抓取合格率取决于吸嘴气孔的形状、孔径、负压等^[104-106],在使用此类结构时可通过 Fluent-EDEM 耦合分析,研究吸嘴作用下气流场特性,明确种子与

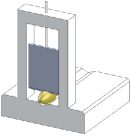
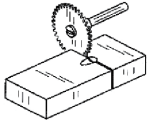
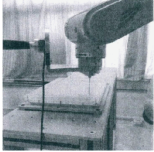
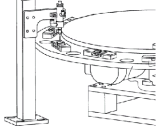
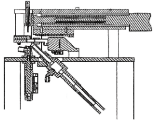
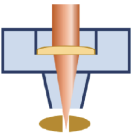
吸嘴形态、负压之间的相互作用机理,提高抓取可靠性。

综上所述,不同的夹持输送技术各有特点,使用时需综合考虑易用性、易操作程度以合理选择、设计。柔性机构的设计以及力控、视觉伺服技术的综合利用可以有效避免种子的机械损伤,这是未来研发的重点和难点。

3.4 取样技术

种子取样技术需要从种子中取出一小块样品用于基因检测。根据其取样方式可分为冲切法、打孔法、拉削法和激光法,典型种子取样技术如表 5 所示。

表 5 种子微创取样技术典型方法
Tab.5 Typical methods for seed micro-invasive sampling technology

方式	主要实现形式	示意图	原理	特点	文献序号
冲切法	刀片剪切		采用曲柄滑块或丝杠螺母机构,将电机的转动转换为刀片的直线运动,进而在种子的母体切割出一小块样品	设备零件标准化与简单化,使得制造成本低廉,设备维护方便,易于推广应用。 缺点是该方案切口大,对种子损伤大	[107]
	旋转切割 刀片切割		使用驱动机构牵引高速旋转的切割刀片靠近并切割玉米种子	使用旋转切割刀片能够对玉米粒进行类似锯的切割效果,从而提升切割质量。 缺点是该方案切口大,对种子损伤大	[53]
	复合冲切		旋转切割件沿侧面切割种子,形成未贯穿的切割槽。随后冲切机构对样品一侧施加压力,切槽部位因应力集中率先断裂,样品完成分离后向下掉落	继承了旋转切割和冲切的优点,样品下落轨迹稳定,不容易发生飞溅且切割质量高	[108]
打孔法	穿刺		取样针头部采用斜 45° 尖头设计,一侧被切削成钩状。取样时,引导机械臂取样针直接插入种子内部,即可在针孔内部获得取下的组织	由于种子的硬度等因素,实际种子取样的设计存在取样成功率低,取样针弯曲无法取样等问题。此外,针孔内部样品的排出问题也有待解决	[109]
	钻孔		钻头对准磨除种皮的区域钻孔,种子内部材料会以粉末状随钻头排出,排出的粉末由收集管收集	所获样品呈粉末状,便于后续检测,但是样品收集和工具清洁较为复杂	[92]
拉削法	拉刀拉削		拉刀做直线往复运动,拉刀刀齿依次切割种子并在竖直方向上不断深入,在种子表面切割出直线形状沟槽,并获得种子内部的样品组织粉末	所获样品呈粉末状,便于后续检测,但是样品收集和工具清洁较为复杂	[52]
	铣刀铣削		当单粒种子运达取样点后,左右由压板将种子固定,随后铣刀刀片前进并在种子表面铣出一个凹槽	所获样品呈粉末状,便于后续检测,但是样品收集和工具清洁较为复杂	
激光法	激光切割		排序完成的种子依次划过激光切割装置的光路,种子的一部分组织在高温下气化,在种子上形成贯穿切痕。当切痕完全扫过种子后,一部分组织与种子分离	非接触切割,可以减少样本接触污染,且加工损耗小。且激光切割过后,切面处会形成碳化层,碳化层阻碍了病菌对切口内部的人侵	[93-94, 96,110]

从目前国内外样机研发结果看,激光法适用范围广,且切割方式灵活,切割参数可以根据种子类型

与环境适时调整,但是激光切割可能会使样品切口横截面碳化,影响样本基因的检测精度。冲切法因

其结构紧凑、效率高、设计简单等因素,受到国内外广大学者的青睐,使用案例较多,但是该方法对于种子有一定损伤,同时种子与刀片需要有一定接触面积,难适用于油菜等小颗粒种子。打孔法和拉削法可以直接获取粉末状样品,免去后续样品粉碎操作,但是存在粉末易发生飘散和黏附等缺陷,不利于样品的收集和刀具的清洁。

3.5 样品收集与清洁技术

3.5.1 样品收集

完成种子取样后,需要对所得样品进行基因检测,进而筛选出符合目标基因型的种子,挑选并培育。因此,种子母体和取下的样品需要定点分类存放,以便系统将种子和样品的坐标编号与种盒上的盒孔编号关联。

为了实现样品的对应收集和存储,研究人员提出了 3 种方案。第 1 种是对于使用机械臂操作的种子取样机,可以在种子切削完成后,直接驱动机械臂将种子母体放入收种盒对应位置^[95]。这种设计减少了装置的机构数量,简化了设计,但是工作速度较慢。

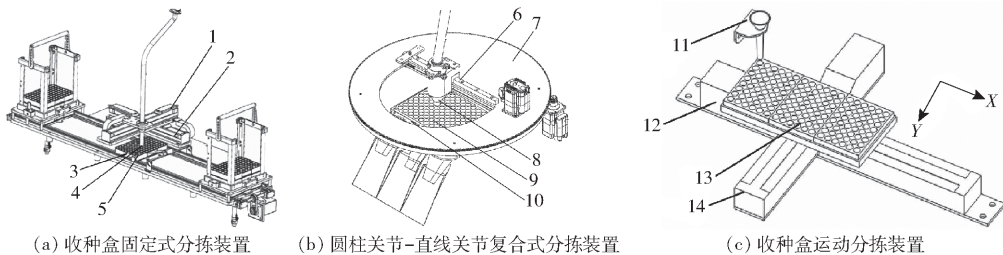


图 12 样品收集装置原理图

Fig. 12 Sample collection device

1、14. Y 轴滑台 2、12. X 轴滑台 3、10. 收种盒 4、8、11. 落料口 5、9、13. 样品槽 6. 直线滑台 7. 圆盘

3.5.2 污染预防及清洁技术

高通量取样过程中,样本基因的污染会影响基因检测的准确度从而影响目标种子的挑选,污染预防及清洁技术能够有效解决这一问题。为满足种子基因样品纯度要求,国内外研究人员分别从种皮 DNA 的污染和样品间的交叉污染两方面开展了一系列研究,力图提升样品纯净度,提高基因提取检测精度。

由于种皮来源于母本,基因型与母本一致,而种子的胚、胚芽等结构的基因型取决于父本和母本,这导致取样时易发生胚乳与种皮混合,进而出现样本的污染,即引入了种皮 DNA 的污染^[113]。而样品间的污染则源于取样过程中上一个种子的样品在各部件之间由于黏附等情况发生残留积聚,并与下一个样品混合后流入样品管中。

为了减少种皮 DNA 的污染,研究者提出先去除

第 2 种是收种盒固定,落料口随十字滑台运动的方案^[51](图 12a),样品通过固定的落料口落入指定样品槽中并记录样品坐标,随后 XY 滑台移动漏斗至底部对准相邻样品槽,等待样品下落。重复此步骤直至遍历整个收种盒的样品槽后即完成单个收种盒的收集。为了缩短滑台的结构,进一步提高滑台的结构紧凑性,文献[111]设计了一种圆柱关节-直线关节复合式平面滑台(图 12b),外圈转盘转动,内部嵌入直线滑台,实现种子的精确安置。由于这类方案依靠重力落料,落料口上方的输种管道的倾角不得小于种子摩擦角,因而取样装置与收种盒高度上要保持较大距离,增加了样品在输种管道中的滑落时间。

第 3 种是收种盒随十字滑台运动的方案^[70,94,112],其基本结构如图 12c 所示。收种盒安装于十字滑台之上,其两端固定,随十字滑台移动。该方案实现效果与“落料口随十字滑台运动”相近,竖直方向空间和种子滑落时间都有所减少,但是平面结构尺寸有所增加,且移动部分需要承载收种盒及配套零部件,运动惯量较大,增加了对驱动性能的要求。

种皮后取样的方案。例如先通过除磨装置去除种子的一部分种皮,露出种子内部的胚乳,然后应用取样工具再次在胚乳区域取样^[92]。

对于样品间的交叉污染,可能是由于多个环节造成,因而选取合适的技术进行清洁是预防污染的重要前提。例如在取样阶段,为了减少切割工具本身残留的组织,文献[52,114]设计了略宽于刀片尺寸的沟槽结构,基于干涉原理在刀片穿越沟槽时将刃口处组织试样除去。针对在锯齿、钻头结构难以深度清洁的问题,文献[92]设计了取样刀头清洗组件,利用气压将闲置的取样刀头进行吹洗以便准备进行下一次取样操作。在样品的收集阶段,文献[92]提出了一种无污染样品收集方案:收集管将种子取样后得到的粉末收集,收集管利用负压将粉末吸入管体,随后将注射针插入相应收集管的尖端内并注入溶液,形成样本悬浊液排到检测试管中。

该方案利用水流清洗的方式在每次取样后对收集管进行清洁,保证了每次取样样品的纯净度。样品收集管、收集漏斗等零部件也可能沉积有残留组织,设计移动式吹扫装置对工作部件正压吹扫,负压收集污染物,可以一次性清洁多个零部件^[30,46]。

总体而言,目前污染防治及清洁技术研究较少,相关的资料较为匮乏,需要在顶层设计时加强污染物的预防研究,从减少组织碎屑产生、飘散,提升清洁部件清洗能力,做好样品存储密封等方面把污染降到最低。

4 发展展望

种子切片装备的研制和推广可以显著提升我国育种实力,是解决种子芯片“卡脖子”难题的重要支撑。目前,我国种子切片装备正处于快速、健康发展时期。随着科技的进步与种业的发展,种子切片装备将迎来新的发展机遇。本文通过对国内外各类种子切片技术与装置的研究现状分析,结合我国育种行业存在的问题与需求,提出以下展望:

(1) 加强种子切片装备基础理论研究

种子切片取样作为一项新兴的技术,涉及自动化、机械、生物、农业等多学科交叉研究。薄弱的基础理论会制约种子切片装备制造过程中结构与参数的选取,阻碍切割精度与质量的提升。随着模拟仿真分析技术的发展,基于动力学、运动学、力学的模拟仿真理论分析研究将有效扩展基础理论研究的深度与广度,为种子取样过程中的物料-刀具交互机理、胚向识别等基础理论研究提供有效指导,进而建立科学的育种切割体系,形成系统而全面的参数指

导手册,为全面分析各参数对切片质量的影响提供更准确更全面技术参考。

(2) 多尺度通用化种子切片平台开发

国内外已有学者研制出大豆、玉米作物种子的切片装备,经过调试后能达到较优的切割效果。由于这类育种切片机械适用作物种类单一,局限于小麦、水稻、玉米等普通农作物的切片,尚未进行其余粮食和经济作物种子的技术攻关与研发,无法满足育种科研机构与企业的需要。研制适用于多尺度、多形态的通用型种子切片机是扩展种子切片装备应用场景的有效手段。多尺度是指从油菜、芝麻等毫米尺度到大豆、花生等厘米尺度的种子均可以进行切割取样,且在取不同的种子时一套机械即可完成,无需更换零部件或仅需要更换简单的零件;多形态是指对于球形、条形、棋形、锥形等多种形态的种子均可以准确可靠的抓取、切割,且不对种子造成伤害。多尺度通用化种子切片平台的开发,可以提高切片平台的易用性和通用性,减少设备采购数量,适应多种作物的检测需求。

(3) 发展全生产环节智慧取样检测系统

种子切片取样过程是一个融合了物理加工和信息控制的过程。将物理加工和信息控制深度融合成数字化取样检测系统,能够进一步提高高通量种子精准切片取样的能力。全生产环节智慧取样检测系统是基于育种切片取样和基因提取的方法,探索信息融合技术原理,打通种子基因检测各环节的技术壁垒,实现从种子取样、检测、挑选、培育到云端大数据综合分析的基因检测技术智慧体系,为种子切片装备智能化、精准化作业奠定基础。

参 考 文 献

[1] 韩小蕊,李瑞. 中国谷物粮食进口贸易现状及问题分析[J]. 价格月刊, 2020(12): 36-42.
HAN Xiaorui, LI Rui. Analysis of the current situation and problems of China's grain import trade[J]. Price Monthly, 2020(12): 36-42. (in Chinese)

[2] 国家统计局. 国家统计局关于 2017 年粮食产量的公告[EB/OL]. http://www.stats.gov.cn/tjsj./zxfb/201712/t20171208_1561546.html.

[3] 河北省粮食和物资储备局. 2021 年中国粮食市场综述[EB/OL]. http://lswz.hebei.gov.cn/lysc/sczx/202202/t20220215_54006.html.

[4] 中华人民共和国农业农村部. 2017 年 1—12 月我国农产品进出口情况[EB/OL]. http://www.gjs.moa.gov.cn/ncpmy/201904/t20190418_6184306.htm.

[5] 孔明忠,王溧彬. 支持大豆和油料产能提升的思考[J]. 农业发展与金融, 2022(11): 68-74.
KONG Mingzhong, WANG Libin. Thoughts on supporting the improvement of soybean and oil production capacity[J]. Agricultural Development and Finance, 2022(11): 68-74. (in Chinese)

[6] 史越英. 中国种业的市场规模与竞争力分析[J]. 分子植物育种, 2022,20(19):6598-6601.
SHI Yueying. Analysis on the market size and competitiveness of China's seed industry[J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(19):6598-6601. (in Chinese)

[7] 程郁,叶兴庆,宁夏,等. 中国实现种业科技自立自强面临的主要“卡点”与政策思路[J]. 中国农村经济, 2022(8): 35-51.
CHENG Yu, YE Xingqing, NING Xia, et al. The main “Stumbling Blocks” and policy suggestions for China's seed industry to achieve self-reliance and self-improvement in science and technology[J]. Chinese Rural Economy, 2022(8): 35-51. (in Chinese)

[8] 黄耀辉,焦悦,吴小智,等. 生物育种对种业科技创新的影响[J]. 南京农业大学学报,2022,45(3): 413-421.
HUANG Yaohui, JIAO Yue, WU Xiaozhi, et al. The influence of biological breeding on the science and technology innovation

- of seed industry[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2022,45(3): 413–421. (in Chinese)
- [9] 翟晨光, 刘龙飞, 姚远, 等. 高通量种子切片技术研究及其在作物育种中的应用[J]. 中国科学院院刊, 2018,33(9): 947–953.
- ZHAI Chenguang, LIU Longfei, YAO Yuan, et al. Advances in seed chipping technology and its applications in crop breeding [J]. Journal of the Chinese Academy of Sciences, 2018,33(9):947–953. (in Chinese)
- [10] FOLGER T. The next green revolution[EB/OL]. <https://www.nationalgeographic.com/foodfeatures/green-revolution/>.
- [11] BOYLE R. How to genetically modify a seed, step by step[EB/OL]. <https://www.popsoci.com/science/article/2011-01/life-cycle-genetically-modified-seed/>.
- [12] 刘世军, 朱立贵, 董合忠, 等. 美国农作物新品种繁育与产业化考察报告[J]. 山东农业科学, 2009(9): 115–118.
- LIU Shijun, ZHU Ligui, DONG Hezhong, et al. Investigation report on the breeding and industrialization of new crop varieties in the United States[J]. Shandong Agricultural Science, 2009(9): 115–118. (in Chinese)
- [13] 李磊鑫. 美国、加拿大现代种业考察报告[J]. 种子世界, 2011(9): 18–20.
- LI Leixin. Investigation report on modern seed industry in the United States and Canada[J]. Seed World, 2011(9): 18–20. (in Chinese)
- [14] 王向峰, 才卓. 中国种业科技创新的智能时代——“玉米育种 4.0”[J]. 玉米科学, 2019, 27(1): 1–9.
- WANG Xiangfeng, CAI Zhuo. Era of maize breeding 4.0[J]. Corn Science, 2019, 27(1): 1–9. (in Chinese)
- [15] 王红梅, 陈玉梁, 石有太, 等. 中国作物分子育种现状与展望[J]. 分子植物育种, 2020,18(2):507–513.
- WANG Hongmei, CHEN Yuliang, SHI Youtai, et al. Current situation and prospect of crop molecular breeding in China[J]. Molecular Plant Breeding, 2020,18(2):507–513. (in Chinese)
- [16] ALOTAIBI F, ALHARBI S, ALOTAIBI M, et al. Wheat omics: classical breeding to new breeding technologies[J]. Saudi. J. Biol. Sci., 2021, 28(2): 1433–1444.
- [17] HUANG X, HUANG S, HAN B, et al. The integrated genomics of crop domestication and breeding[J]. Cell, 2022, 185(15): 2828–2839.
- [18] MARHADOUR S, PRODHOMME C. Recent trends in genetics studies and molecular breeding of potato[M]. Academic Press, 2023: 273–301.
- [19] VASIL I K. A history of plant biotechnology: from the cell theory of Schleiden and Schwann to biotech crops[J]. Plant Cell Reports, 2008, 27(9):1423–1440.
- [20] OLSEN O A, LINNESTAD C, NICHOLS S E. Developmental biology of the cereal endosperm[J]. Trends in Plant Science, 1999, 4(7): 253–257.
- [21] 程文, 夏正俊, 冯献忠, 等. 一种快速、无损大豆种子 DNA 提取方法的建立和应用[J]. 植物学报, 2016, 51(1): 68–73.
- CHENG Wen, XIA Zhengjun, FENG Xianzhong, et al. A rapid and nondestructive method for soybean DNA extraction and its application[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2016,51(1): 68–73. (in Chinese)
- [22] HASH J R C, BLAKE T. Half-seed determination of hordeins associated with known M1-a alleles conferring race-specific resistance to barley powdery mildew[Erysiphe graminis f. sp. hordei][J]. Barley Genetics Newsletter, 1981,11:74–76.
- [23] 赵姝华, 李文利. 农作物种子及半粒种子 DNARAPD 扩增研究[J]. 国外农学: 杂粮作物, 1999(3):23–26.
- ZHAO Shuhua, LI Wenli. Study on DNARAPD amplification of crop seeds and half-seeds[J]. Foreign Agronomy: Miscellaneous Crops, 1999(3):23–26. (in Chinese)
- [24] ARBELAEZ J D, TANDAYU E, REVECHE M Y, et al. Methodology: ssb-MASS: a single seed-based sampling strategy for marker-assisted selection in rice[J]. Plant Methods, 2019, 15(1): 1–11.
- [25] MCCARTHY P L, HANSEN J L, ZEMETRA R S, et al. Rapid identification of transformed wheat using a half-seed PCR assay[J]. Biotechniques, 2002, 32(3): 560–564.
- [26] CHUNWONGSE J, MARTIN G, TANKSLEY S. Pre-germination genotypic screening using PCR amplification of half-seeds[J]. Theoretical and Applied Genetics, 1993, 86(6): 694–698.
- [27] 王惠, 郭峰, 关超, 等. 适用于 SSR 分析的半粒水稻干种子 DNA 快速提取[J]. 科技导报, 2013,31(25):58–60.
- WANG Hui, GUO Feng, GUAN Chao, et al. Rapid DNA extraction from half-grain rice dry seeds for SSR analysis[J]. Science & Technology Review, 2013,31(25):58–60. (in Chinese)
- [28] 赵国珍, 贾育林, 严宗卜, 等. 一种高效便捷的水稻 DNA 提取法及其应用[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(4): 495–499.
- ZHAO Guozhen, JIA Yulin, YAN Zongbu, et al. An efficient, economic, and rapid rice DNA extraction method and its application[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2012, 26(4): 495–499. (in Chinese)
- [29] 翟文学. 谷类作物半粒种子的 PCR 分析及其在标记辅助选择育种中的应用[J]. 生物工程学报, 1996, 12(4): 416–421.
- ZHAI Wenxue. PCR analysis of half-grain seeds of cereal crops and its application in marker-assisted selection breeding[J]. Journal of Bioengineering, 1996, 12(4): 416–421. (in Chinese)
- [30] 任强, 张增艳, 黄鹏. 半粒小麦种子 DNA 提取的研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2010, 45(4): 59–62.
- REN Qiang, ZHANG Zengyan, HUANG Peng. DNA extraction from half grain wheat seeds[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2010, 45(4): 59–62. (in Chinese)
- [31] 中国农业科学院作物科学研究所. 一种种子组织微创取样方法及其应用: CN 113373199 A[P]. 2021–09–10.
- [32] VON POST R, VON POST L, DAYTEG C, et al. A high-throughput DNA extraction method for barley seed[J]. Euphytica, 2003, 130(2): 255–260.
- [33] MOTOKAZU K, TADAHIKO K. Rapid DNA extraction method from soybean seeds[J]. Breed Sci., 2003, 53: 277–279.
- [34] SUASTE-DZUL A P, RODRÍGUEZ-VÉLEZ J M, RODRÍGUEZ-VÉLEZ B, et al. Non-destructive DNA extraction methods for entomophagous insects with emphasis on biological control[J]. Genome, 2019, 62(4): 287–293.
- [35] 夏正俊, 李玉卓, 朱金龙, 等. 快速、无损大豆种子连续取样技术及其 DNA 制备[J]. 植物学报, 2021, 56(1):56–61.

- XIA Zhengjun, LI Yuzhuo, ZHU Jinlong, et al. A rapid, non-destructive and continuous sampling technique and DNA extraction for soybean seed[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2021, 56(1):56–61. (in Chinese)
- [36] Pioneer Hi Bred International Inc. Automated high-throughput seed sample processing system and method; US6706989B2[P]. 2004–03–16.
- [37] Monsanto Technology LLC. High throughput automated seed analysis system; CA 2539935C[P]. 2015–11–17.
- [38] 美国陶氏益农公司. 种子切割系统; CN 107921653 B[P]. 2020–01–21.
- [39] Syngenta Participation Ag. Automated seed chipping apparatus; WO 2011163326A2[P]. 2012–03–01.
- [40] Limagrain Europe SA. Procédé d'échantillonnage de tissu de graines; FR 3016698B1[P]. 2020–10–30.
- [41] Dow AgroSciences LLC. System for seed preparation and method of use; US 20150319914A1[P]. 2018–05–29.
- [42] KING C. Seed chipper lets breeders take a peek at a seed's DNA[EB/OL]. <https://www.topcropmanager.com/seed-chipper-lets-breeders-take-a-peek-at-a-seeds-dna-5026/>.
- [43] AGROLINK P. Monsanto mostra seed chipper no Show Rural Coopavel 2012[EB/OL]. <https://www.youtube.com/watch?v=UnV-im-Y6Is>.
- [44] AGROLINK. Monsanto mostra seed chipper no Show Rural Coopavel 2012[EB/OL]. https://www.agrolink.com.br/eventos/video/monsanto-mostra-seed-chipper-no-show-rural-coopavel-2012_6263.html.
- [45] DADDYSTRATOR. Can you eat like your ancestors? [EB/OL]. <https://daddystrator.com/2015/07/08/1852/>.
- [46] 中科科正自动化有限公司[WB/OL]. <http://www.hfkzgc.com/index.php?c=content&a=list&catid=70>.
- [47] 李露. 先进制造所承担的中国科学院战略性先导科技专项(A类)子课题任务通过专家技术验收[EB/OL]. http://www.hf.cas.cn/xwzx/gzdt/201811/t20181122_5191517.html.
- [48] 中玉金标记. 中玉金标记推出高通量玉米种子切片机和种子挑选机为中国分子育种助力! [EB/OL]. http://www.cgmb.com.cn/index.php/Home/Index/news_xiangqing?id=82.
- [49] 央视网. 福建: 育种有了新工具, 核心设备中国造 [EB/OL]. <https://sannong.cctv.com/2021/11/24/ARTIAYAhPwPbghQjpk9Oxn221124.shtml>.
- [50] 赵泽军. 浙大山东农研院赋能临沂现代农业高质量发展[N]. 临沂日报, 2022–10–21.
- [51] 中玉金标记(北京)生物技术股份有限公司. 分拣装置及种子自动切片采样设备; CN 106217432B[P]. 2018–07–17.
- [52] 孟山都技术有限公司. 自动种子取样器及对种子进行取样试验并散装的方法; CN 102742394 B[P]. 2014–06–04.
- [53] 孟山都技术有限公司. 用于处理杂交种子的系统和方法; CN 101868141 B[P]. 2012–07–11.
- [54] 孟山都技术有限公司. 用于从种子除去组织样品的自动化系统和相关方法; CN 110769682 A[P]. 2020–02–07.
- [55] 沈阳理工大学. 一种双层转盘式育种激光自动切片取样机; CN 105537777[P]. 2017–06–16.
- [56] JAHNKE S, ROUSSEL J, HOMBACH T, et al. Pheno seeder-a robot system for automated handling and phenotyping of individual seeds[J]. Plant Physiology, 2016, 172(3): 1358–1370.
- [57] 中科院合肥物质科学研究院先进制造技术研究所. 一种自动种子取样机; CN 104458319 A[P]. 2015–03–25.
- [58] 刘彩玲, 李方林, 袁昊, 等. 超级杂交稻压电振动式匀种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊1): 58–68. LIU Cailing, LI Fanglin, YUAN Hao, et al. Design and experiment of piezoelectric vibration seed homogenizer for super hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 58–68. (in Chinese)
- [59] 刘彩玲, 王超, 宋建农, 等. 振动供种型孔轮式非圆种子精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 108–115. LIU Cailing, WANG Chao, SONG Jiannong, et al. Design and seed-filling test of cell-type precision seed-metering device with vibration technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 108–115. (in Chinese)
- [60] 黄小毛, 朱恒, 张顺, 等. 基于振动盘供种的混编景观种子带编织机设计[J]. 农业工程学报, 2022, 38(7): 10–19. HUANG Xiaomao, ZHU Heng, ZHANG Shun, et al. Design of mixed landscape seed belt knitting machine based on vibration disk supply[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(7): 10–19. (in Chinese)
- [61] 中玉金标记(北京)生物技术股份有限公司. 水稻种子分拣装置及水稻种子切片采样设备; CN 109622422A[P]. 2019–04–16.
- [62] 王应彪, 赵学观, 徐丽明, 等. 基于电磁振动的玉米种子定向排序输送技术[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 79–88. WANG Yingbiao, ZHAO Xueguan, XU Liming, et al. Directional sorting and transportation technology of corn seeds based on electromagnetic vibration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 79–88. (in Chinese)
- [63] 张东兴, 于天成, 杨丽, 等. 基于振动排序的玉米种子胚面向装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 122–131. ZHANG Dongxing, YU Tiancheng, YANG Li, et al. Design and experiment of maize seed germ orientation device based on vibration sequencing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 122–131. (in Chinese)
- [64] 张斌, 俞亚新, 赵匀. 超级稻种定向播种的原理研究[J]. 浙江理工大学学报, 2008, 25(4): 454–456. ZHANG Bin, YU Yaxin, ZHAO Yun. Research on the principle of directional seeding of super rice seeds[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2008, 25(4): 454–456. (in Chinese)
- [65] 杨潭, 王应彪, 李玮, 等. 离心式玉米种子定向整列排种装置设计与试验[J]. 南京农业大学学报, 2022, 45(4): 809–817. YANG Tan, WANG Yingbiao, LI Wei, et al. Design and test of centrifugal corn seed directional row metering device[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2022, 45(4): 809–817. (in Chinese)
- [66] 邢洁洁, 徐丽明, 马帅, 等. 马齿形玉米种子尖端激光定向与胚面识别装置研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 52–59. XING Jiejie, XU Liming, MA Shuai, et al. Development of laser orientation and embryo surface recognition device for horsetooth corn seed tip[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 52–59. (in Chinese)
- [67] JAYAS D, KARUNAKARAN C, PALIWAL J. Grain quality monitoring using machine visio and soft X-rays for cereal grains

- [C]//Proceedings of the International Quality Grains Conference Proceedings, 2004.
- [68] 杨万能. 水稻产量相关性状参数自动提取的数字化技术研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2011.
YANG Wanneng. Research on digital technology for automatic extraction of rice yield correlation parameters[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [69] 李为坤, 黄成龙, 叶军立, 等. 水稻全自动脱粒检测一体化考种机关键技术研发[C]//第十九届中国作物学会学术年会论文摘要集, 2020.
LI Weikun, HUANG Chenglong, YE Junli, et al. Research and development of key technologies of rice automatic threshing and detection integrated seed testing machine[C]//Abstracts of the 19th Annual Conference of the Chinese Crop Society, 2020. (in Chinese)
- [70] 吴婷婷. 单粒小麦种子表型精细化获取方法研究与装备研发[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2020.
WU Tingting. Sophisticated phenotyping and equipment development of individual wheat seed[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese)
- [71] 覃志杰. 基于结构光成像的作物籽粒 3D 表型测量研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2022.
QIN Zhijie. 3D phenotypic measurement of crop grain based on the structured light imaging[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [72] 刘伟, 刘长虹, 郑磊. 基于支持向量机的多光谱成像稻谷品种鉴别[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 145–151.
LIU Wei, LIU Changhong, ZHENG Lei. Discrimination in varieties of rice seeds with multispectral imaging using support vector machine[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 145–151. (in Chinese)
- [73] 张灿. 基于 CT 的水稻谷粒 3D 性状无损测量及表型分析研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2020.
ZHANG Can. Nondestructive measurement and phenotyping analysis of rice grain 3D traits based on X-ray computed tomography[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [74] GARGIULO L, GRIMBERG Å, REPO-CARRASCO-VALENCIA R, et al. Morpho-densitometric traits for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seed phenotyping by two X-ray micro-CT scanning approaches[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 90: 102829.
- [75] 宋怀波, 尚钰莹, 何东健. 果实目标深度学习识别技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 1–19.
SONG Huaibo, SHANG Yuying, HE Dongjian. Review on deep learning technology for fruit target recognition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 1–19. (in Chinese)
- [76] CHANG A C. Intelligence-based medicine: artificial intelligence and human cognition in clinical medicine and healthcare[M]. Academic Press, 2020.
- [77] SHU X, YE Y. Knowledge discovery: methods from data mining and machine learning[J]. Social Science Research, 2022, 110: 102817.
- [78] 戚兴怡, 胡耀峰, 王若愚, 等. 机器学习在新材料筛选方面的应用进展[J]. 化学学报, 2023, 81(2): 158–174.
QI Xingyi, HU Yaofeng, WANG Ruoyu, et al. Recent advance of machine learning in selecting new materials[J]. Acta Chimica Sinica, 2023, 81(2): 158–174. (in Chinese)
- [79] 何勇, 李禧尧, 杨国峰, 等. 室内高通量种质资源表型平台研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 127–141.
HE Yong, LI Xiyao, YANG Guofeng, et al. Research progress and prospect of indoor high-throughput germplasm phenotyping platforms[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(17): 127–141. (in Chinese)
- [80] 宁纪锋, 何东健, 杨蜀秦. 玉米籽粒的尖端和胚部的计算机视觉识别[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 117–119.
NING Jifeng, HE Dongjian, YANG Shuqin. Identification of tip cap and germ surface of corn kernel using computer vision[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(3): 117–119. (in Chinese)
- [81] 李跃华, 冯启高, 侯志松, 等. 基于机器视觉的君迁子种子尖端特征识别方法研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(10): 210–212.
LI Yuehua, FENG Qigao, HOU Zhisong, et al. Identification method of diospyros lotus seeds tip characteristics based on machine vision[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(10): 210–212. (in Chinese)
- [82] 杨蜀秦, 宁纪锋, 何东健. 基于 Harris 算子的籽粒尖端识别方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 166–169.
YANG Shuqin, NING Jifeng, HE Dongjian. Identification of tip cap of agricultural kernel based on Harris algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 166–169. (in Chinese)
- [83] 丁宪. 大粒种子定向播种装置的研制[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.
DING Xian. The machine of the directional swon for the large seeds[J]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)
- [84] 郑雅心. 玉米籽粒姿态识别算法研究及提取分拣平台软件设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
ZHENG Yaxin. Research on algorithm of corn kernel gesture recognition and software design of extraction and sorting platform[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [85] KIM D E, CHO H K, CHANG Y S, et al. Development of an automatic seeding system using machine vision for seed line-up of cucurbitaceous vegetables[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2007, 32(3): 179–189.
- [86] 马鸿润. 面向人工智能育种的大豆种子表型特征数据采集与分析[D]. 威海:山东大学, 2020.
MA Hongrun. The collection and analysis of soybean seed phenotypic characteristic data for artificial intelligence breeding[D]. Weihai: Shandong University, 2020. (in Chinese)
- [87] 王侨, 陈兵旗, 寇春荣, 等. 基于机器视觉的玉米种粒定向定位摆放装置研制[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 19–28.
WANG Qiao, CHEN Bingqi, KOU Chunrong, et al. Development of corn seed directional positioning machine based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(11): 19–28. (in Chinese)
- [88] 李广伟, 谷侃锋, 赵明扬. 育种用玉米种子切片取样自动定向方法与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 40–47.
LI Guangwei, GU Kanfeng, ZHAO Mingyang. Method and experiment on automatic orientation of slice sampling for corn seed

- [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4):40–47. (in Chinese)
- [89] WEI Y, GU K, TAN L. A positioning method for maize seed laser-cutting slice using linear discriminant analysis based on isometric distance measurement[J]. Information Processing in Agriculture, 2022, 9(2): 224–232.
- [90] 周磊. 基于光谱和图像的小麦表型信息感知方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2022.
ZHOU Lei. Research on wheat phenotypic information perception method based on spectrum and image[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese)
- [91] 宋韬, 曾德超. 基于人工神经网络的玉米籽粒形态识别方法的研究[J]. 农业工程学报, 1996, 12(1): 177–181.
SONG Tao, ZENG Dechao. An investigation on morphological discrimination of corn kernels based on neural network[J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(1): 177–181. (in Chinese)
- [92] 孟山都技术有限公司. 自动无污染种子取样器和对种子进行取样、检测和分群的方法: CN 101437391 B[P]. 2013–06–12.
- [93] 先锋国际良种公司. 自动化种子取样设备方法和系统: CN 102686099 B[P]. 2014–09–10.
- [94] 中国科学院合肥物质科学研究院. 一种种子自动取样方法: CN 109060450 A[P]. 2018–12–21.
- [95] 中国科学院沈阳自动化研究所. 玉米育种取样自动切片机: CN 205414714 U[P]. 2016–08–03.
- [96] 沈阳理工大学. 一种转盘式作物育种激光切片自动取样机: CN 107462438[P]. 2019–06–11.
- [97] 苏建华, 刘传凯, 王智伟, 等. 面向 3 维物体的三指机械手“包笼抓取”方法[J]. 机器人, 2021, 43(2):129–139.
SU Jianhua, LIU Chuankai, WANG Zhiwei, et al. Caging grasp of 3D objects with a three-finger gripper[J]. Robot, 2021, 43(2):129–139. (in Chinese)
- [98] 姜凯, 张骞, 王秀. 机械式自清洁播种头设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20):18–23.
JIANG Kai, ZHANG Qian, WANG Xiu. Design and test on self-cleaning seeding head for mechanism suction[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(20): 18–23. (in Chinese)
- [99] 甘裕明. 液滴微操作机械手的开发与应用研究[D]. 广州:华南理工大学, 2016.
GAN Yuming. The development and application research of micromanipulator based on liquid-drop[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [100] 方海峰, 黄希, 范纪华, 等. 仿鸟喙微型气动软体机械手爪的设计及优化[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(1):67–74.
FANG Haifeng, HUANG Xi, FAN Jihua, et al. Design and optimization of micro pneumatic soft manipulator gripper imitating bird's beak[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2022, 41(1):67–74. (in Chinese)
- [101] 彭瀚旻, 李华峰, 惠耀, 等. 应用人工肌肉 IPMC 材料的三指微型柔性手爪设计[J]. 振动·测试与诊断, 2010, 30(4):347–352, 469.
PENG Hanmin, LI Huafeng, HUI Yao, et al. Design of three-finger flexible microgripper using IPMC materials as artificial muscles[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(4):347–352, 469. (in Chinese)
- [102] 马奎. 一种整体式力敏微型机械手[J]. 工具技术, 2000(8):19–21.
MA Kui. An integral force-sensitive micro manipulator[J]. Tool Technology, 2000(8):19–21. (in Chinese)
- [103] 宋俊男. 基于二维力反馈的机械手夹持器设计与研究[D]. 无锡:江南大学, 2017.
SONG Junnan. Design and research on a robot manipulator gripper based on two-axial force feedback[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017. (in Chinese)
- [104] 李正仁. 负压吸种与正压卸种穴盘播种装置的设计[J]. 农机使用与维修, 2022(10):31–33.
LI Zhengren. Design of negative pressure seed suction and positive pressure seed unloading hole plate seeding device[J]. Agricultural Machinery Using & Maintenance, 2022(10):31–33. (in Chinese)
- [105] 赵璐. 蔬菜种子三维特征的测量及精密排种器吸嘴设计的研究[D]. 南京:南京农业大学, 2022.
ZHAO Lu. Measurement of three-dimensional characteristic of vegetable seed and research on the design of precision metering device suction nozzle[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [106] 胡飞. 气吸式种子检测分选线的研制及吸附试验分析[D]. 湖州:湖州师范学院, 2022.
HU Fei. Development and adsorption test analysis of air suction seed detection and sort device[D]. Huzhou: Huzhou Normal University, 2022. (in Chinese)
- [107] 河南农业大学. 半自动玉米育种切片机: CN 103252800 B[P]. 2015–01–28.
- [108] 中玉金标记(北京)生物技术股份有限公司. 种子定位装置及种子自动切片采样设备: CN 108120616 B[P]. 2021–06–15.
- [109] 史景飞. 基于几何约束的种子取样机器人示教及自标定方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2017.
SHI Jingfei. Research on self-calibration based on geometric constraints and the direct teaching for seed sampling robot[D]. Hefei: China University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [110] 杨小东. 作物种子取样自动化设备的设计与优化[D]. 合肥:合肥工业大学, 2016.
YANG Xiaodong. Design and optimization of seed sampling automation equipment[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [111] Pioneer Hi Bred International Inc. Apparatus, method and system for reconfiguring items: US 8033426B2[P]. 2011–10–11.
- [112] 中国科学院合肥物质科学研究院. 一种 PCR 盘定位装置: CN 105273983 B[P]. 2017–06–16.
- [113] 李慧琴, 丁丽, 王韵翔, 等. 玉米育种取样机技术研究[J]. 种子世界, 2017(10):55–56.
LI Huiqin, DING Li, WANG Yunxiang, et al. Research on maize breeding sampler technology[J]. Seed World, 2017(10): 55–56. (in Chinese)
- [114] 山东登海种业股份有限公司. 一种玉米育种切片机: CN 109605452 B[P]. 2020–11–10.