

基于协作机器人的自动化种子浸泡系统开发

徐 猛¹ EDWIN Ang² 朱博文¹ 唐鑫锐¹ 周彦达¹ 张礼宁¹ 刘春霞¹

(¹先正达种业科技(中国)有限公司,陕西咸阳 712100;²Syngenta Asia Pacific Pte., Ltd., Singapore 117406)

摘 要:在生物育种过程中,基因分型技术可以帮助育种家筛选目的品种,种子浸泡是基因分型过程中的关键工序。传统的种子浸泡技术是通过单台仪器驱动注射分液器来实现,这种技术需要人员值守在仪器旁进行微孔板的上下料,效率较低。为提升效率,开发了以可编程逻辑控制器(PLC)为核心的自动化种子浸泡系统,并创新性地将协作机器人技术应用到自动化种子浸泡系统中,该技术具有安全性、易用性、灵活性等特点,可以实现人机协作。通过对基于协作机器人的自动化种子浸泡系统进行介绍,阐述了软硬件配置以及实现的控制功能,并做了性能测试和基因分型实验测试,结果满足生物育种的需求。与传统的种子浸泡技术相比,该系统无需人员值守,提高了实验通量,加速了生物育种过程。

关键词:生物育种;基因分型技术;协作机器人;自动化种子浸泡系统;人机协作

Development of Automated Seed Soaking System based on Collaborative Robot

XU Meng¹, EDWIN Ang², ZHU Bowen¹, TANG Xinrui¹,

ZHOU Yanda¹, ZHANG Lining¹, LIU Chunxia¹

(¹Syngenta Seeds Technology (China) Co., Ltd., Xianyang 712100, Shaanxi; ²Syngenta Asia Pacific Pte., Ltd., Singapore 117406)

在生物育种中,基因分型技术是鉴定目标性状编码基因是否发生预期改变的关键手段,而DNA提取则是该技术的核心环节之一。其中,将植物种子置于试剂中浸泡是提取DNA的重要步骤。传统种子浸泡通常依赖单台分液仪器(如BioTek MultiFlo FX)完成,其操作需人工值守并反复进行微孔板的上下料,处理通量有限,效率较低。

近年来,随着机器人技术的快速发展,机器人在不同领域得到越来越广泛的应用。协作机器人的概念最早于1995年由美国西北大学的爱德华和迈科尔博士提出,称为合作机器人(Cobot, Collaborative robot),2009年丹麦优傲(UR)公司推出了其首款产品UR5^[1]。其他如库卡等传统工业机器人公司也不断推出自己的人机协作机器人^[2]。协作机器人具有安全性、易用性、灵活性等特点。安全问题是人机协作系统的基础,协同工作必须以保障操作人员的安全为前提^[3];易用性和灵活性是人

机协作系统的重点,能够快速适应柔性的、复杂的生产方式是协作机器人的优势。得益于协作机器人部署灵活、操作简单、设计安全的特点,其在智能制造、快递物流、家庭服务、医疗健康等领域具备良好的应用前景^[4]。将协作机器人技术应用到生物育种的种子浸泡工序,实现自动化和人工协同作业,有望推动该领域的技术升级。

本文旨在介绍一种集成协作机器人的自动化种子浸泡系统,重点阐述其硬件结构、软件架构及测试验证。与传统的种子浸泡系统相比,该系统可显著提升实验通量与效率,并为后续育种研究的高通量、标准化操作提供技术支持。

1 自动化种子浸泡系统特点

协作机器人技术集成到种子浸泡系统中,使该自动化系统具备人机协作的特点,同时也具有安全、易用和灵活的特点。

1.1 安全性

集成到种子浸泡系统中的协作机器人通过装备先进的传感器(如力矩传感器和碰撞检测系统),能够在与工作人员互动时立即检测到接触并限制力量输出,从而防止意外伤害。自动化种子浸泡系统通过集成先进的光电传感器技术以及基于可编程逻辑控制器(PLC, Programmable logic controller)的控制程序,使得机器人能够感知周围环境,包括人的存在与动作,从而确保安全互动。例如,集成光学传感器实时监测工作区域,通过图像处理技术识别潜在的碰撞风险,当工作人员进入协作区域时,提前采取规避措施,将机器人的速度降低到安全速度来预防潜在危险。

1.2 易用性

协作机器人具有拖拽示教的技术特点,即可以通过手动引导机器人手臂完成一系列动作,机器人随后自动记录这些动作并转化为可重复的程序。在自动化种子浸泡系统中,上下料的位置以及中间关键过程位置多达上百个,在这种复杂的工作环境下,拖拽示教技术极大地简化了编程过程,提高了工作的效率。

1.3 灵活性

首先,自动化种子浸泡系统具有轻量化设计的技术特点,降低了机器人对操作人员的潜在伤害风险。其次,自动化系统具有模块化设计的技术特点,尤其

是自动化系统中的协作机器人采用了高度模块化设计,将机器人分解成多个独立的轻量化模块,可以根据不同的任务需求快速更换末端执行器^[5]、传感器和其他组件,方便更换和升级,提高了机器人的多功能性和适应性。集成化的设计将传感器、控制器等部件尽量集成在一起,减少外部连线,既减轻了重量,又简化了安装和维护过程。最后,集成了协作机器人的自动化种子浸泡系统也具有力控与柔顺控制技术的特点,通过集成高精度的力矩传感器和先进的控制算法,协作机器人能够实现力控操作,即在与物体或工作人员接触时,根据接触力的大小和方向调整动作,实现柔顺的交互。这不仅提高了安全性,也使得机器人在执行需要精细力控的任务时更加灵活。

2 自动化种子浸泡系统硬件结构

自动化种子浸泡系统硬件结构示意图见图1,其具有模块化的设计特点,以PLC为核心,集成了协作机器人、注射泵分液系统、分液针位置驱动系统、微孔板传送系统、安全部件以及防错装置等功能模块。人机协作区域如图1虚线区域,操作人员将装有种子的微孔板放置在工作台面上,协作机器人将微孔板从工作台面转移到种子浸泡系统的上料位,在微孔板传动系统的作用下,微孔板被传送到分液位,在注射泵分液系统和分液针位置驱动系统的配合下,将1#试剂和2#试剂分液到微孔板中,然后

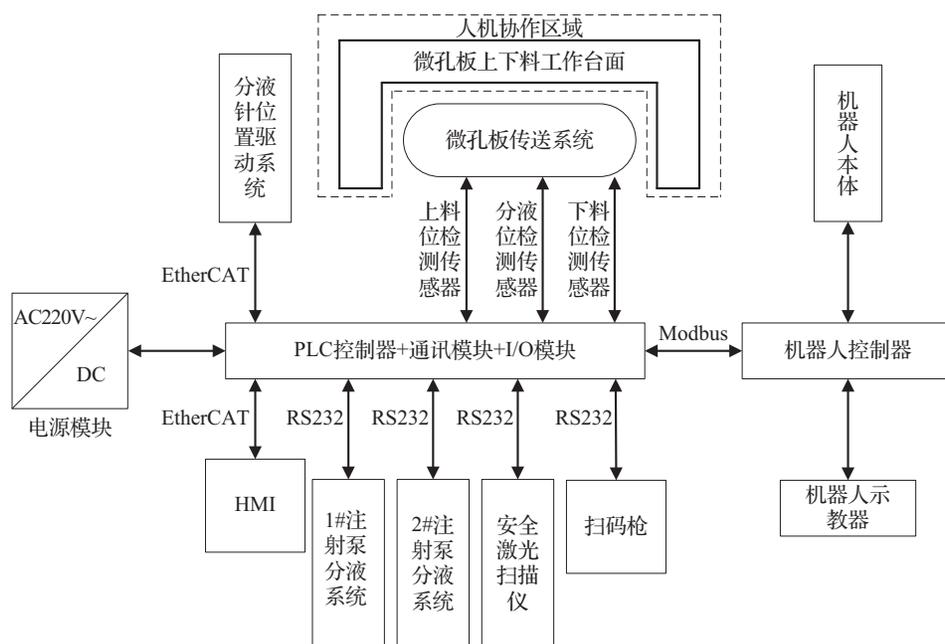


图1 硬件结构示意图

传输到传送系统下料位,协作机器人将其转移到工作台上,该工作台面最多可以放置 96 块微孔板。这种种子浸泡自动化方案,极大提升了实验通量,节省了人力。

2.1 协作机器人

协作机器人具有轻松编程、快速安装和设置、重新部署灵活、人机协作和安全等特点,具有丰富的通讯接口,与 PLC 之间通过 Modbus 通讯进行数据交互。机器人的尺寸、功能等性能参数均能满足生物育种微孔板的移栽功能。协作机器人主要由 3 部分组成:控制器、示教器和机器人本体,如图 2 所示。



图 2 协作机器人示意图

2.2 注射泵分液系统

注射泵分液系统核心组件主要由可编程控制器、驱动电机、电磁阀和多通道注射泵组成。它具有可编程、免维护、精密性高等技术特点,通过步进电机和精密滚珠丝杠来驱动注射泵。在全行程分液时,变异系数值可达到 0.05%,精度高达 $\pm 0.2\%$,适用于生物育种技术。

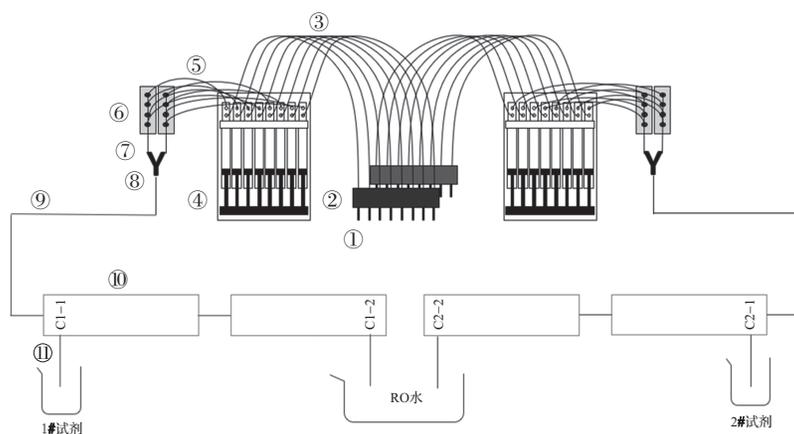
注射泵分液系统通过 RS232 通讯集成到自动

化控制系统中,完成闭环控制。自动化种子浸泡系统配置了两套多通道注射器分液系统,可以根据植物种子 DNA 提取的要求,将两种不同的试剂按照设定的参数同时分液到微孔板中。该注射泵分液系统管路示意图见图 3,左侧为 1# 注射泵分液系统,用于将 1# 试剂分液到微孔板中,右侧为 2# 注射泵分液系统,用于将 2# 试剂分液到微孔板中。注射泵分液系统管路主要由以下部件组成:①分液针,②梳状连接器,③液体分配头管路,④ 8 通道注射泵,⑤注射泵管路,⑥多路连接器,⑦多路连接器管路,⑧ Y 型连接器,⑨连接器管路,⑩电磁控制阀以及连接器,⑪电磁阀连接管路(图 3)。在工作模式时,C1-1/C2-1 电磁控制器打开,C1-2/C2-2 电磁控制阀关闭,注射泵活塞往下运动开始吸液,试剂进入注射泵的管路中,分液时,注射泵活塞向上运动,根据种子浸泡的工艺要求,将特定体积的试剂分配到微孔板中。清洗模式时,C1-1/C2-1 电磁控制器关闭,C1-2/C2-2 电磁控制阀打开,注射器泵电机带动 8 通道注射泵,进行往复动作,完成清洗管路的工作。

2.3 分液针位置驱动系统

分液针位置驱动系统与注射泵分液系统配合,将两种不同的试剂精准地分配到每个孔中,进行种子 DNA 的提取。

分液针位置驱动系统的核心硬件设计采用电机控制系统。该系统由电机控制器、电机和电缸组成。基于主从架构,电机控制器与 PLC 控制系统实现数据交互。电机集成了编码器,可以实现闭环控制,满足种子 DNA 浸泡提取的实验工况。电缸为



①分液针,②梳状连接器,③液体分配头管路,④ 8 通道注射泵,⑤注射泵管路,⑥多路连接器,⑦多路连接器管路,⑧ Y 型连接器,⑨连接器管路,⑩电磁控制阀以及连接器,⑪电磁阀连接管路

图 3 注射泵分液系统管路示意图

丝杠式电缸,采用负向挡块寻零方式。如上技术特性,可以满足微孔板分液需求。分液针位置驱动系统和 PLC 之间的硬件连接如图 4。

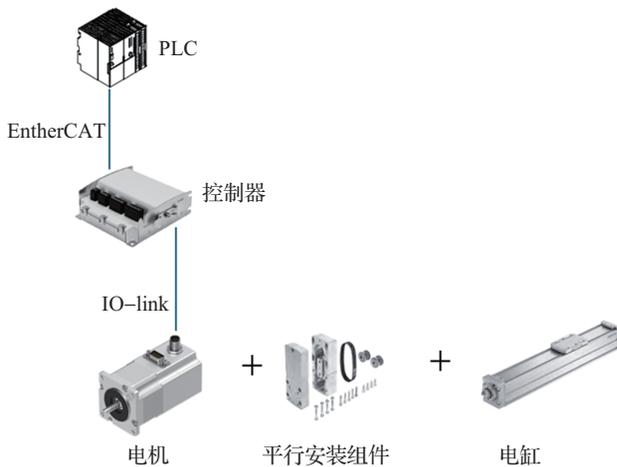


图 4 分液针位置驱动系统连接图

2.4 微孔板传送系统

微孔板传送系统用于将微孔板转移到特定的工作位置。在正常工作时,协作机器人将工作台上放置的微孔板(装有待浸泡的种子)转移到传动系统的上料位,上料位的光电传感器检测到微孔板时,传送系统上料位的电控挡块缩回,传送带将微孔板转移到分液位,在分液针位置驱动系统和注射泵分液系统的动作完成后,传送系统分液位的电控挡块缩回,传送带将分液后的微孔板转移到传送系统的下料位,等待协作机器人将微孔板放置到工作台上。

微孔板传送系统的核心硬件设计采用集成度较高的小型输送带,该输送带在驱动轴中集成了 24VDC 无刷直流电机,电机转速可调,且采用电动机中部驱动的方式,电机防护等级 IP65,能够适应 DNA 浸泡实验的工况环境。

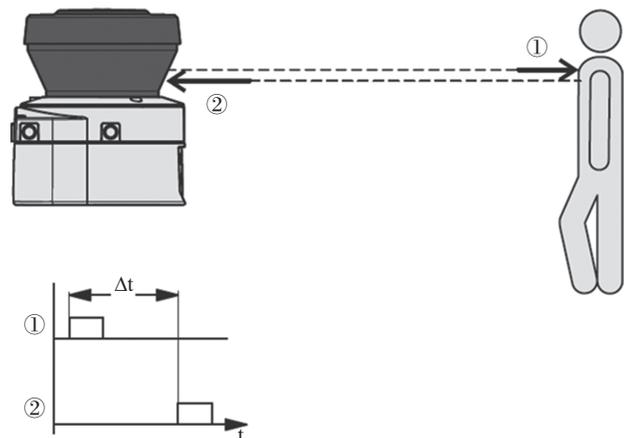
输送带控制器通过两个控制信号连接到 PLC 的控制模块上。当控制电压在 5~24VDC 范围时,输送带开始往设定的方向运动。

3 自动化种子浸泡系统安全部件

3.1 安全激光扫描仪

安全激光扫描仪是自动化种子浸泡系统的核心安全部件之一,集成到自动化控制系统中,与协作机器人配合使用。安全激光扫描仪是光学传感器,利用红外激光光束对周围进行二维扫描。该扫描仪

具备检测精度高、检测范围广和信号处理能力强的特点。根据飞行时间测量的原理运行,激光扫描仪发出极短的光脉冲,并同时运行“电子秒表”。如果光线遇到物体,物体将放射光线并由安全激光扫描仪接收。设备通过发送和接收时间点之间的时间差(Δt)计算出与物体的距离,由于使用主动扫描原理,因此无需外部接收器和反射器,检测原理示意图见图 5。安全激光扫描仪中有一面匀速旋转镜,可以使光脉冲转向,可以识别 270° 以内保护区域的物体。根据安全激光扫描仪的选型以及种子浸泡时人机协作工况,可以设置协作区域。当人进入协作区域时,协作机器人进入缩减模式,每个轴的速度降低到安全速度。



①发送的光脉冲;②反射的光脉冲

图 5 安全激光扫描仪检测原理

3.2 防错装置

在育种过程中,根据不同类型或者方法的 DNA 提取需求,定义不同的项目类型,为了区分不同类型的项目,定义不同的编号,工作人员会将项目编号生成条形码,张贴在微孔板上。在浸泡种子时,不同类型的项目需要添加的试剂体积和种类是有差异的。为了防止加错试剂,自动化种子浸泡系统设计了项目编号自动比对的方法防止错误发生。将扫码枪安装在微孔板的上料位,并接入 PLC 中。在进行实验项目时,首先在 HMI 上选择需要进行的项目,协作机器人将微孔板放置到微孔板传送系统的上料位,该位置的光电传感器检测到微孔板后触发扫码枪工作,扫码枪解码项目类型的条形码并将其传输到 PLC 控制系统中,PLC 控制系统经过软件解析,提取需要的项目类型信息,与 HMI 上项目后台设置的项目编号参数

作对比,如果结果对比一致,进行种子浸泡流程,如果编码对比结果不符,设备报警,流程终止。

这是一种自动化视觉检测的防错方法,可以快速准确识别条形码,提高了生物育种过程中的质量控制,减少混料导致的质量问题,降低人为失误的概率。

4 自动化种子浸泡系统软件架构

4.1 软件介绍

自动化种子浸泡系统软件部分由 PLC 控制软件、协作机器人编程软件、注射泵电机控制软件、位置驱动电机软件以及安全激光扫描仪控制软件等组成,这些软件集成到一套自动化系统中,完成自动化种子浸泡功能。

PLC 控制软件是自动化控制系统的核心,自动化种子浸泡系统基于 PLC 控制软件设置 HMI 界面程序以及下位机控制程序,HMI 界面用于人员操作以及参数设置,下位机控制程序用于实现自动逻辑控制。协作机器人编程软件是一种图形用户界面

(GUI),用于创建机器人运动轨迹的程序,实现微孔板上下料移栽功能,设置安全限值等,也可以手动操控机器人。注射泵电机控制软件通过设置注射泵分液位置和速度等参数来控制注射泵分液量。位置驱动电机软件用于设置位置驱动系统的控制模式和轴参数等,将试剂分液到不同位置的微孔板孔中,在软件上设置不同的程序,通过 PLC 调用,兼容不同类型的微孔板。安全激光扫描仪控制软件用于设置种子浸泡系统的协作区域,当人员进入协作区域时,触发协作机器人进入缩进模式。

4.2 自动化工作流程

自动化种子浸泡系统程序架构设计基于结构化的编程思想,对各功能单元程序进行调用。每个单元都有其独立的程序区、数据区和设置区。在调用该单元时,就能把该单元相关的逻辑、接口、数据、参数等一起调用过来。例如 POU_Festo () 是分液针位置驱动系统功能单元,在主程序 Main 中被调用。工作流程图见图 6。

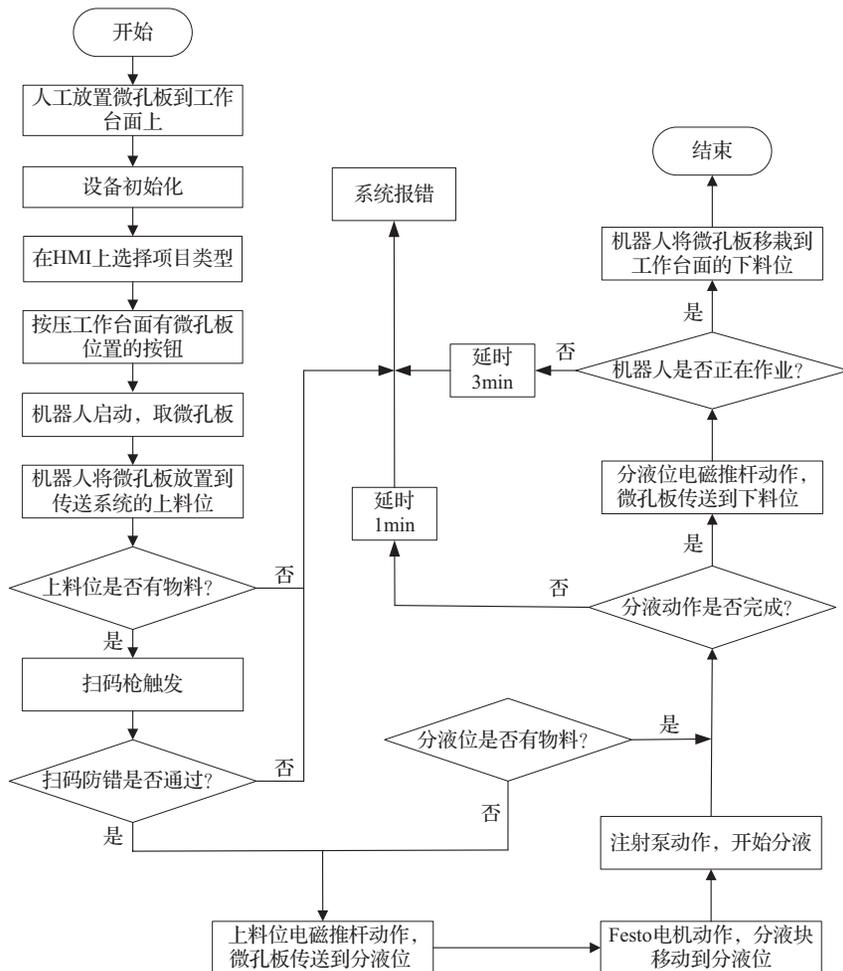


图 6 自动工作流程图

5 自动化种子浸泡系统性能测试

5.1 产能测试

测试方法: 同一名操作人员进行同一个实验项目, 分别通过自动化种子浸泡系统和 BioTek MultiFlo FX 种子浸泡系统完成 96PCS 微孔板的分液, 测试 96PCS 微孔板分液, 计算每板分液时间 (Cycle time)。Cycle time 对比见图 7。

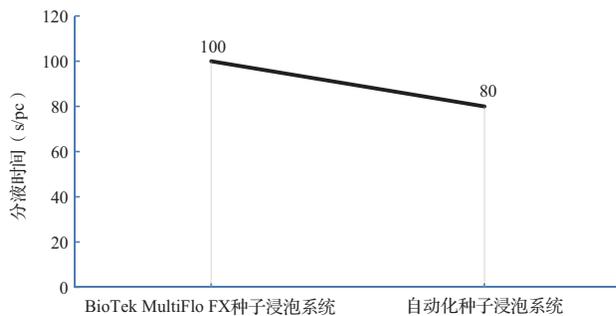


图 7 分液时间对比图

结论:(1)同样的产能, 自动化种子浸泡系统 Cycle time 节省 20%。(2) BioTek MultiFlo FX 种子浸泡系统需要人员值守在仪器旁, 自动化种子浸泡系统可以实现无人值守, 更节省人工。

5.2 分液精度测试

测试方法: 1# 和 2# 通道以 RO 水做介质, 使用 3PCS 48 孔微孔板, 分液体积为 2000 μ L, 计算加入 RO 水标准重量, 然后使用高精度天秤测出实际重量, 通过对比算出误差值, 计算分液精度。1# 通道和 2# 通道分液精度对比见图 8 和图 9。

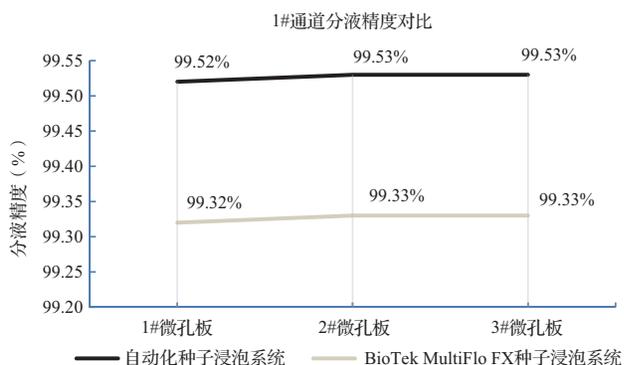


图 8 1# 通道分液精度对比

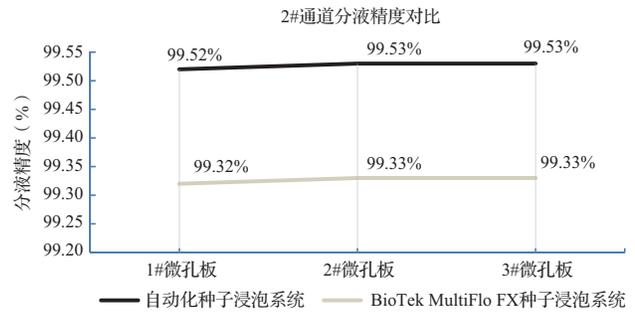


图 9 2# 通道分液精度对比

结论: 由图 8、图 9 可知, 自动化种子浸泡系统分液精度更高。

5.3 基因分型试验测试

按照玉米种子基因分型试验方法测试, 使用耗材 48 well plate 和 48 well mat, Marker 编号如下: S0128EQ、S0250CQ、S0302CQ、S0320BQ、S0358AQ、S0376BQ、S0979BQ、S1015CQ、S1023CQ、S1089BQ、S2417、S3750、TRE40, 其中每 2 个 48 孔板为一种材料, 一共 15 份材料 30PCS 板子, 样品信息如表 1。

表 1 样品信息

序号	材料编号	项目编号	样品批次号
1	SX-1	Y-80	L-Mat-58
2	SX-2	Y-80	L-Mat-59
3	SX-3	Y-80	L-Mat-60
4	SX-4	Y-81	L-Mat-61
5	SX-5	Y-79	L-Mat-49
6	SX-6	Y-79	L-Mat-50
7	SX-7	Y-79	L-Mat-51
8	SX-8	Y-79	L-Mat-52
9	SX-9	Y-79	L-Mat-53
10	SX-10	Y-79	L-Mat-54
11	SX-11	Y-79	L-Mat-55
12	SX-12	Y-79	L-Mat-56
13	SX-13	Y-79	L-Mat-57
14	24-11 (D)	Y-84	L-Mat-11
15	24-15 (D)	Y-84	L-Mat-15

以 Y-81 项目 13 个标记为例,散点分布表现见图 10。结论:图中显示样品在 13 个标记上集群紧密且不同基因型之间分离清晰,在个别标记上观察到离群点和条纹状集群,但仍在可接受范围内。其中包含了与性状相关标记的检测,结果显示

良好。

基因分型试验测试结果见表 2。结论:(1)同一样品批次都具有相同的基因型结果规律;(2)每批次样品不可用数据比例 <3% 均满足生产供应链要求。



图 10 散点分布图

(下转第 64 页)

人工晾晒易导致种子灰质化,使发芽率下降,工作效率降低,推行机械烘干技术势在必行。卧式静态烘干机凭借投资成本低、操作简便、烘干质量可靠等优势,已取代塔式循环烘干机成为海南主流机型,其低温静态烘干模式契合杂交水稻种子易裂颖、怕堆沤的特性,当前全域设备保有量超 800 台,可满足核心产区烘干需求。针对其场地占用大、自动化不足等问题,可通过采用可拆式箱体、改进装卸机构、严控收割水分及缩短收烘间隔等措施优化。在未来,以新质生产力为引领,通过数字化监控、人工智能赋能提升烘干智能化水平,破解专业人才不足与标准化缺失难题;推动种子烘干与精选、包装等加工环节配套融合,构建收获后一体化自动化流水作业体系,降低物流与运行成本。持续完善机械化烘干布局,强化设备配套与技术升级,助力海南南繁杂交水稻产业高质量、可持续发展,巩固我国杂交水稻制种“硅谷”地位。

参考文献

[1] 王春乙. 海南气候. 北京:气象出版社,2014

(上接第 60 页)

表 2 基因分型试验测试结果

样品批次号	样品总数	通过样品数	失败样品数	失败率 (%)	不可用数据比例 (%)
L-Mat-58	92	92	0	0	1.00
L-Mat-59	92	92	0	0	0.36
L-Mat-60	92	92	0	0	0.27
L-Mat-61	92	92	0	0	0.27
L-Mat-49	92	91	1	1.09	0.82
L-Mat-50	92	92	0	0	0.18
L-Mat-51	92	91	1	1.09	0.64
L-Mat-52	92	92	0	0	0.91
L-Mat-53	92	90	2	2.17	0.56
L-Mat-54	92	91	1	1.09	0.18
L-Mat-55	92	91	1	1.09	0.27
L-Mat-56	92	92	0	0	0.27
L-Mat-57	92	89	3	3.26	0.37
L-Mat-11	92	91	1	1.09	0.37
L-Mat-15	92	89	3	3.26	0.47

失败样品数按照该样品在超过 2 个标记上不可用数据比例 >3% 统计

[2] 巫玉平. 海南省杂交水稻制种产业现状及发展前景. 种子世界, 2013 (12):3-4

[3] 汤曼卓. 杂交水稻种子成套加工工艺. 中国种业, 2023 (12):102-105

[4] 张浩, 汤健良, 匡新华, 陈勇, 鲁春霞, 刘社发, 蒋良辉, 张维亮, 袁辉, 胡一鸿. 杂交水稻隆两优华占“灰质化”种子发芽习性初探. 杂交水稻, 2020, 35 (6):88-93

[5] 袁源, 张浩, 匡新华, 张维亮, 蒋良辉, 金晨钟, 陈勇, 汤健良, 胡一鸿. 湿种堆沤对杂交水稻种子“灰质化”及贮藏温度对不同程度“灰质化”种子的活力影响. 杂交水稻, 2022, 37 (3):95-98

[6] 吕晓琴, 陈小敏, 潘志华, 吕润. 海南岛春季两系杂交水稻安全制种时空分布研究. 热带生物学报(中英文), 2025, 16 (4):519-527

[7] 刘爱民, 肖层林, 廖伏明. 杂交水稻制种产业回顾及持续发展对策. 杂交水稻, 2023, 38 (3):154-158

[8] 刘爱民, 刘俊龙, 张海清, 李步勋, 朱彦, 张青, 蒋珊瑚, 贺记外. 杂交水稻种子机械干燥技术. 杂交水稻, 2020, 35 (4):34-36, 66

[9] 刘俊龙, 刘爱民, 张海清, 张青, 庞嘉, 曹衍, 董帅厅, 夏继印. 杂交水稻种子机械烘干特性初步研究. 杂交水稻, 2018, 33 (2):31-35

[10] 汤健良. 杂交水稻种子企业质控标准及质量保障措施. 中国种业, 2021 (6):20-23

[11] 刘爱民, 唐文帮. 杂交水稻种子生产加工机械化技术的进步与发展. 中国稻米 2025, 31 (4):71-78

(收稿日期:2025-12-08)

6 小结

基于协作机器人的自动化种子浸泡系统显著提高了植物基因分型样品制备的效率和可靠性。该自动化种子浸泡系统的灵活性和智能化程度较高,是自动化工程、机器人工程与生物育种等学科交叉应用的一次实践,有助于实现更高效、更精准的样品制备过程。该系统为大规模植物基因分型实验提供了有力的技术支持,有望推动植物育种的快速发展。

参考文献

[1] 霍淑珍,何志超. 协作机器人在智能制造中的应用. 机床与液压, 2021, 49 (9):62-66

[2] 俞庆华. 2019 年协作机器人行业发展蓝皮书发布. 汽车零部件, 2019 (10):92

[3] 王迈新. 协作型机械臂动态避障运动规划研究. 西安:西安工业大学, 2024

[4] 黄海丰, 刘培森, 李擎, 于欣波. 协作机器人智能控制与人机交互研究综述. 工程科学学报, 2022, 44 (4):780-791

[5] 王小月. 不是黑科技 不是噱头 机器人时代真的来了. 中国消费者报, 2018-08-23 (04) (收稿日期:2025-12-08)