

基于电容检测技术的蒜种鳞芽扶正装置设计与试验

侯加林^{1,2} 方立志^{1,2} 李玉华^{1,2} 吴彦强^{1,2} 周 凯^{1,2}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018)

摘要: 针对传统机械方式鳞芽扶正率低、可靠性差等问题,提出了一种基于电容检测技术的蒜种鳞芽定向方法,搭建了相应的鳞芽检测与扶正装置,并对其结构和运行参数进行了优化。基于 ANSYS 电场分析验证了方法的可行性,基于 EDEM 仿真平台进行了接播装置结构的优化。结果表明,当接播装置底面夹角、短轴半径、长轴半径分别为 80°、22.99 mm 和 27.79 mm 时,装置性能最优,理论直立率为 96.6%,物理试验验证了优化结果的可靠性。以极板参数为试验因素,以信噪比为试验指标,开展极板尺寸优化试验。结果表明,极板参数为 45 mm × 8 mm × 0.10 mm 时,装置性能最优。以金乡、苍山蒜种为试验对象,开展样机试验,正芽率为 95.0%,满足大蒜播种要求。

关键词: 大蒜播种机; 鳞芽扶正装置; 电容检测; ANSYS; EDEM

中图分类号: S223.2⁺5; F407.67 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)04-0063-10

OSID:



Design and Test of Garlic Clove Orientation Device Based on Capacitive Detection Technology

HOU Jialin^{1,2} FANG Lizhi^{1,2} LI Yuhua^{1,2} WU Yanqiang^{1,2} ZHOU Kai^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. Shandong Provincial Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence, Taian 271018, China)

Abstract: In order to solve the problem of low upright rate of traditional machinery, a method for determining the garlic clove orientation based on capacitive detection technology was proposed. There were differences in morphological structure between the bud and the root: under the same width, the volume of the bud was smaller than that of the root. The feature was exploited and converted to an average dielectric constant difference to determine the orientation of the garlic clove by detecting the capacitance. The feasibility of the method was verified based on the electric field analysis of ANSYS in the research process. In addition, the corresponding bud adjustment device was designed. Orthogonal tests took the short axis radius, long axis radius, and bottom angle of the device as the test factors and the upright rate as the test indicators, and the test data were analyzed by Design-Expert 11.1.2.0 software to obtain the order of influence of each factor on the index value. The results showed that when the bottom angle, short axis radius, and long axis radius were 80°, 22.99 mm, and 27.79 mm, respectively, the device performance was optimal and the theoretical upright rate was 96.6%. The test verification of the optimized factors was basically consistent with the optimized results. With the pole plate parameter as the test factor and the signal-to-noise ratio as the test indicators, the test data showed that the device performance was optimal when the pole plate parameter was 45 mm × 8 mm × 0.10 mm. The prototype test was carried out with Jinxiang and Cangshan garlic cloves, and the qualified rate was 95.0%, which met the requirements of garlic sown. The research result can provide support for the application of capacitance detection technology in precision sowing equipment.

Key words: garlic seeder; clove orientation device; capacitance detection; ANSYS; EDEM

收稿日期: 2022-08-04 修回日期: 2022-10-13

基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-24-D-01)、泰山产业领军人才工程项目和中国博士后科学基金面上项目(2019M662410)

作者简介: 侯加林(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备研究,E-mail: jilhou@sdau.edu.cn

通信作者: 周凯(1987—),男,副教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: zhengkai2017@sdau.edu.cn

0 引言

在播种作业中,蒜种鳞芽朝上率对大蒜产量、品质及出苗一致性有重要影响^[1]。然而,现有播种设备在鳞芽定向、扶正方面存在效果差、成本高和可靠性差等问题,限制了大蒜种植产业的发展^[2]。

现有的大蒜播种机以机械调整为主,如双鸭嘴式^[3]、三级锥形料斗式^[4]、螺旋管式^[5]等,这类装置以结构创新为主,对特征明显的蒜种调整效果较好,但对以金乡蒜为代表的杂交蒜调整效果不理想,无法满足播种要求。随着自动控制技术的发展,出现了一些新的定向方法,GENG等^[6]使用红外传感器配合蒜种盒设计了一种全自动蒜种定向装置,通过判定是否检测到蒜种鳞芽实现蒜种定向;LI等^[7]通过机器视觉对蒜种朝向进行判定,通过机器学习实现蒜种定向。但以上方法操作复杂且成本较高,难以实现大规模推广。近年来,电容检测技术^[8]因具有非侵入性、快速性、低成本等优点,已在农业领域得到广泛应用。王金武等^[9]设计了一种电容式稻谷含水率在线检测装置;李晋阳等^[10]设计了一套基于阻抗和电容的番茄叶片含水率实时监测系统;周利明等^[11]设计了一套差分式电容肥料流量传感器,实现了对肥料流量的精准监控,相关方法为大蒜鳞芽定向提供了解决思路。

本研究基于蒜种生物形态差异,提出基于电容检测技术的蒜种鳞芽判定方法,并搭建相应的鳞芽扶正试验装置,即通过检测同一蒜种两端电容,对鳞芽朝向进行判定并完成扶正操作。首先借助ANSYS电场仿真技术,验证方法的可行性,设计基于电容检测技术的蒜种鳞芽定向装置的整体结构,并通过EDEM仿真分析软件进行仿真分析和结构优化。在此基础上,基于物理试验对极板参数进行优化,提高装置的抗干扰能力。最后设计样机进行性能验证。

1 测量原理与信号质量评价指标

1.1 测量原理

蒜种与空气的介电常数存在显著差异,因此当蒜种通过圆柱形电容器所形成的检测空间时,极板间的等效介电常数发生变化,电容随之变化。如图1所示,通过观察蒜种形态及查阅文献[12-13]可知,蒜种的形态学结构为不规则的扁球状,同一蒜种存在“等宽度下(本文中特指极板宽度)鳞芽端体积小于须根端体积”特性。分别检测同一蒜种鳞芽端与须根端落入电容检测装置并达到稳定时极板间的电容,可将蒜种形态差异转化为电容差异,以初始状态

电容为基准值,对比两状态下的电容变化量,即可实现对蒜种鳞芽朝向的判定。



图1 蒜种形态学结构

Fig.1 Morphological structure of garlic species

本文采用的圆柱形电容器电容 C_s 的计算公式为

$$C_s = \frac{2\pi\epsilon_r d}{\ln \frac{R_b}{R_a}} \quad (1)$$

式中 ϵ_r ——极板间介电常数,F/m

d ——极板宽度,m

R_b ——外侧极板半径,m

R_a ——内侧极板半径,m

极板间的介电常数 ϵ_r 为

$$\epsilon_r = \epsilon_0 \frac{V_0}{V} + \epsilon_a \frac{V_a}{V} + \epsilon_b \frac{V_b}{V} \quad (2)$$

式中 ϵ_0 ——空气介电常数,F/m

ϵ_a ——衬板介电常数,F/m

ϵ_b ——蒜种介电常数,F/m

V_0 ——极板间空气所占体积, m^3

V_a ——极板间衬板所占体积, m^3

V_b ——极板间蒜种所占体积, m^3

V ——极板总体积, m^3

1.2 信号质量评价指标

信号采集过程中,硬件结构参数、外界干扰对识别准确率存在直接影响。为优化上述指标,需对获取的信号质量进行评价,信号质量的评价指标^[14]信噪比 R 为

$$R = 10 \lg \frac{P_s}{P_n} \quad (3)$$

式中 P_s ——信号功率,W

P_n ——噪声功率,W

功率 P 计算公式为

$$P = \frac{U^2}{X_c} = U^2 \omega C \quad (4)$$

式中 ω ——信号角频率

X_c ——容抗, Ω

C ——电容,F

U ——极板间电压

信噪比可化简为

$$R = 10 \lg (\Delta C_s / \Delta C_n) \quad (5)$$

式中 ΔC_s ——有用信号波动量
 ΔC_n ——噪声波动量

2 工作原理分析与试验装置设计

2.1 基于 ANSYS 的电场建模与原理验证

为验证方案原理上的可行性,通过仿真分析软件 ANSYS Electronics Desktop(2019 R2)对蒜种下落过程的空间电容传感器进行仿真分析。假定静电场中电介质常数恒定,传感器铜质极板电介质各部分同性、均匀分布,场内电位满足拉普拉斯方程。依据蒜种形态学结构及相关统计数据,设置电极基本参数为:接播装置外侧周长为 50 mm,电极板之间不能

相互接触,设置总长度的 1/10 为空隙,故极板长度为 45 mm;极板宽度为 8 mm;铜箔纸厚度为 0.1 mm,极板材质选择铜。极板衬底选择丙烯腈-丁二烯-苯乙烯聚合物,相对介电常数为 2;电容传感器周边选择 AIR(空气)进行填充,相对介电常数为 1.000 6;设置蒜种长度为 32.38 mm,蒜体最宽处为 16.32 mm,厚度为 18.98 mm,设置其相对介电常数为 15。左右极板间施加激励电压 0.5 V(与 FDC2214 相匹配),使等效蒜种沿极板间中轴线以步长 2 mm 向极板下边沿运动。

其运行过程三维示意图及电场分布如图 2 所示。

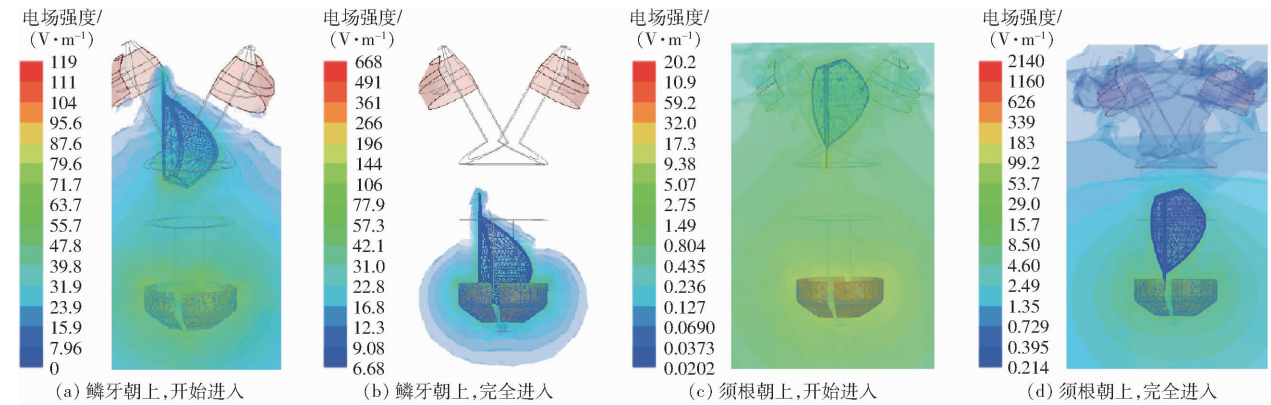


图 2 蒜种运动过程及电场分布

Fig.2 Garlic motion process and electric field distribution

如图 3 所示,初始状态为空状态,极板尺寸为 45 mm×8 mm×0.10 mm,蒜种鳞芽朝上落入空间电容传感器,未进入空间电容传感器时的空载电容初始化为 0;蒜种开始下落,极板间的电容变化速度提高,在 32 mm 处蒜种落入极板范围,电容变化速度达到最大;电容继续增加,在 40 mm 处,蒜种进入极板的体积达到最大,停止下落后极板电容变化量达到最大值 0.05 pF。蒜种须根朝上落入空间电容传感器,未进入空间电容传感器时的空载电容初始化为 0;蒜种开始下落,极板间的电容变化速度提高,在 32 mm 处蒜种落入极板范围,在 34 mm 处电容变化速度达到最大;电容继续增加,在 40 mm 处,蒜种进入极板的体积达到最大,停止下落后极板电容变化量达到最大值 0.03 pF。

蒜种两次下落过程中,电容变化曲线均出现三角状尖峰,这是蒜种与电容极板的边沿效应所致。由仿真数据可知,电容随蒜种落入极板的体积增大而增大,表明极板间的介质体积会对检测电容产生影响。蒜种下落达到稳定后,“鳞芽朝上”时电容变化量约为 0.05 pF,“须根朝上”时电容变化量约为 0.03 pF,其数值差异明显。这是因为蒜种鳞芽端体积明显小于须根端体积,导致了不同朝向时电容变

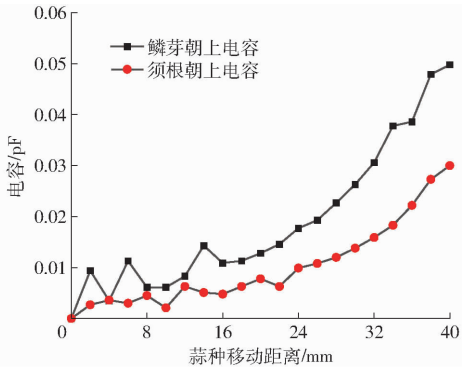


图 3 空间电容与蒜种位置变化关系曲线

Fig.3 Diagram of space capacitance and position change

化量的显著差别,以上试验数据为蒜种状态的判定提供了依据。作为可行性探索,本模型未考虑外界电磁、振动等干扰因素,但通过该仿真可获得较为精确的电容变化量数据(实际测量电容变化量由于蒜种下落位姿、振动等因素有所增大),以上结论可为后续空间电容传感器检测技术路线规划、极板尺寸设置等提供必要参考。

2.2 试验装置设计

2.2.1 工作流程

大蒜机械化播种包括:单粒取种、鳞芽扶正和直立插播 3 个环节,其中单粒取种^[15-16]和直立插

播^[17-18]的研究已相对成熟,鳞芽扶正成为制约大蒜机械化播种的关键难题^[19]。

为实现鳞芽定向与扶正,本研究提出了一种基于电容差异的检测方法。如图4所示,其检测和扶正流程包括:①未落入蒜种时(状态0),检测第一、二接播装置初始电容 C_{s0} 、 C'_{s0} ,作为电容变化基准值。②打开第一接播装置,蒜种落入第二接播装置(状态1),检测第二接播装置电容,记为 C_{s1} 。③舵

机驱动整个装置顺时针翻转180°,蒜种因重力落入第一接播装置,检测第一接播装置电容,记为 C_{s2} 。④计算上述两种状态下电容变化量,若 $C_{s1}-C'_{s0}<C_{s2}-C_{s0}$,表明“鳞芽朝上”,此时第一接播装置打开,蒜种落入插播装置,整个装置逆时针翻转复位至初始状态;若 $C_{s1}-C'_{s0}>C_{s2}-C_{s0}$,表明“须根朝上”,舵机驱动整个装置逆时针翻转复位至初始状态,同时完成了蒜种扶正,最后第二接播装置打开,蒜种落

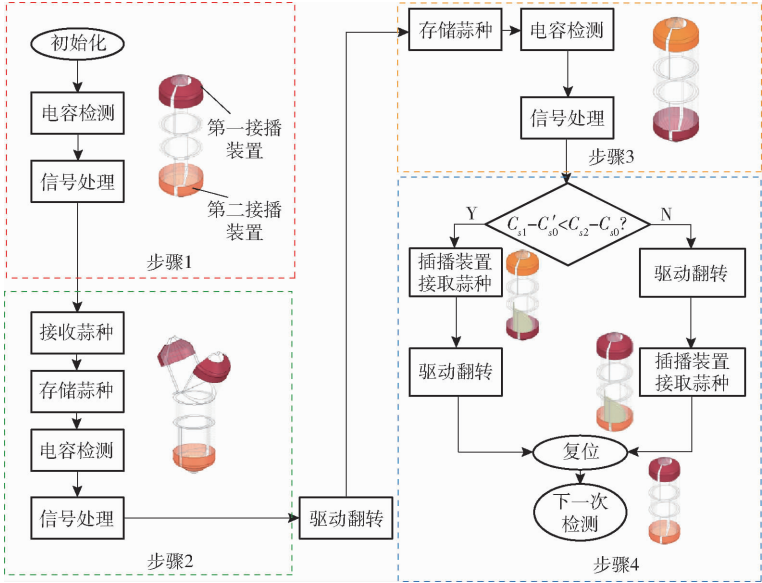


图4 检测与扶正流程图
Fig.4 Detection and upright flow char

入插播装置。

2.2.2 核心部件设计

为满足播种要求,基于电容检测技术对鳞芽扶正装置进行设计。蒜种鳞芽扶正装置结构如图5所示,主要由支撑架、驱动装置及电容检测装置构成。其关键部件电容检测装置由第一接播装置、第二接播装置及传输通道组成。蒜种鳞芽检测与扶正装置采用了上下对称结构,可以实现整个机构面内180°

往复翻转。图5还展示了挡板与支架横杆的位置关系,通过舵机驱动二者相互作用可实现上端开口,实现蒜种接收。

如图6所示,电容检测系统硬件由STM32F407主控板(意法半导体)、FDC2214电容传感器芯片(德州仪器)、LM2596稳压芯片(德州仪器)及7.2V锂电池构成。为减少外界环境干扰、提高检测精度,采用差分结构^[20-21]进行电容检测,图6展示了差分电容检测装置的相关配置。设置电极板为电容器一极,被测物体为另一极,二者形成一对电极板。

2.2.3 可行性验证

如图7所示,依据上述原理搭建关键部件试验台,选取金乡蒜种开展试验。蒜种检测装置首先检测空状态下电容,采样次数达到50次后停止检测;以鳞芽向上状态手动放入蒜种,电容检测装置检测蒜种须根端电容,采样次数达到100后停止检测;舵机驱动翻转,稳定后重新检测蒜种鳞芽端电容,采样次数达到150后停止检测,试验结果如图8所示。

采样50次时,电容检测装置内由初始空状态变为鳞芽朝上,检测装置获得的电容数据在0.054 pF

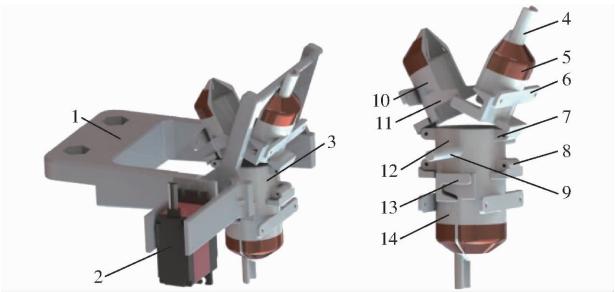


图5 蒜种鳞芽检测与扶正装置结构图
Fig.5 Structure diagram of garlic clove detection and righting device

1. 支撑架 2. 驱动装置 3. 电容检测装置 4. 驱动挡板 5. 电极板 6. 连接板 7. 铰链固定件 8. 铰链连接件 9. 舵机连接轴 10. 第一接播装置 11. 开合从动板 12. 传输通道 13. 开合主动板 14. 第二接播装置

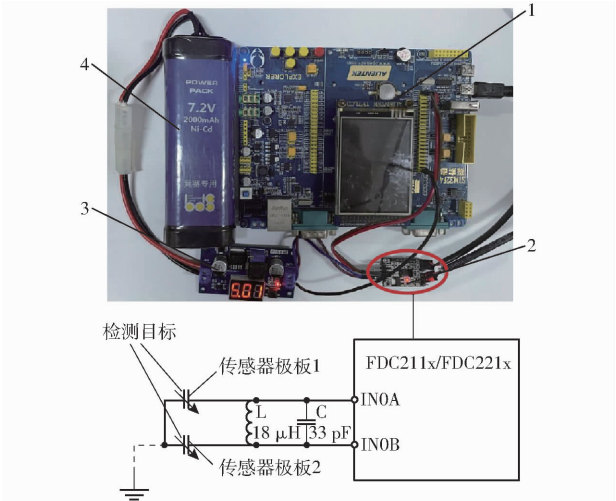


图 6 硬件结构配置

Fig. 6 Hardware configuration

1. STM32F407 主控板 2. FDC2214 电容传感器芯片 3. LM2596 稳压芯片 4. 7.2 V 锂电池

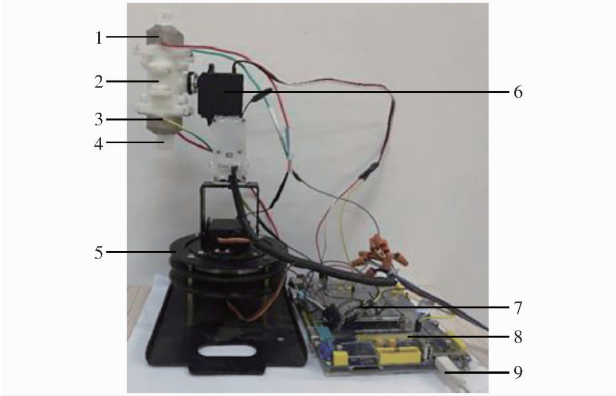


图 7 关键部件试验台

Fig. 7 Key component test bench

1. 第一接播装置 2. 传输通道 3. 电容检测装置 4. 第二接播装置 5. 转向台 6. 转向舵机 7. 电容采集芯片 8. 计算处理器 9. 电源线

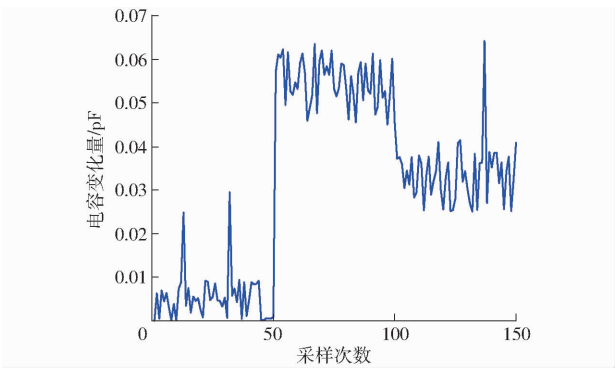


图 8 电容变化量变化曲线

Fig. 8 Capacitance change value

处波动;采样 100 次时,蒜种检测装置由鳞芽朝上变为须根朝上,检测装置获得的电容在 0.034 pF 处波动。上述结果说明本文提出的方法可行,从检测结果还可以看出,检测过程中由于振动、电磁等干扰因

素产生了异常点,因此还需对检测装置及采样方式进行优化。

3 关键部件结构设计与优化

3.1 机械结构优化设计

检测过程中,接播装置用来接收蒜种并初步调整位姿,理想的接收效果主要有:保证蒜种完全落入接播装置;保证蒜种落入后保持直立状态。为保证蒜种完全落入接播装置,应增大接播装置的内径尺寸,以确保尺寸较大的蒜种可以顺利进入;为保证蒜种落入后保持直立状态,应使蒜种更多的接触接播装置侧壁,从而产生平衡作用力。通过上述的结构分析可知,接播装置的结构参数对蒜种的直立率有较大影响,为获得最佳的结构参数,同时降低设计成本,进行离散元仿真及优化设计。

3.1.1 离散元仿真模型

蒜种由单粒取种装置进入鳞芽扶正装置过程中会发生多次干涉碰撞,大蒜的运动较为复杂,为减少无效运算,对鳞芽检测与扶正装置进行了简化设计,简化后的模型如图 9 所示。本研究采用离散元分析软件 EDEM 进行仿真分析^[3,22]。以金乡蒜为试验对象,根据李玉华等^[23]的研究,仿真过程中设置蒜种三维尺寸分布情况如下: $L_d \sim N(32.38, 2.22^2)$, $W_d \sim N(16.32, 3.16^2)$, $T_d \sim N(18.98, 2.91^2)$,其中 L_d 、 W_d 、 T_d 分别代表长度、宽度、厚度。颗粒与颗粒间及颗粒与装置间的接触模型均采用 Hertz - Mindlin 模型,仿真模型及关键结构参数(d_1 、 d_2 、 θ)如图 10 所示。

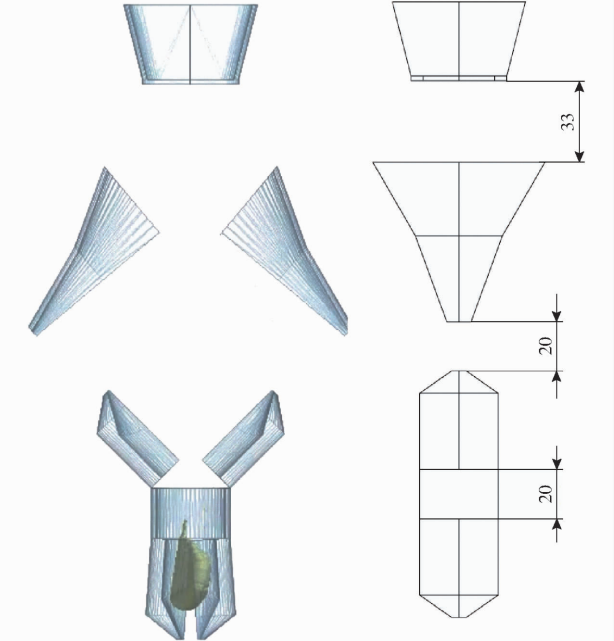


图 9 EDEM 仿真模型

Fig. 9 EDEM simulation model

3.1.2 接播装置影响因素分析

如图 10 所示,蒜种鳞芽扶正装置的主要结构参数包括:底面夹角 θ 、短轴半径 d_1 、长轴半径 d_2 。取上述 3 个变量作为正交试验因素,以蒜种喂入并达到稳定后的直立率为试验响应指标。综合考虑结构尺寸限制,确定了各试验因素的取值范围:底面夹角为 $60^{\circ} \sim 100^{\circ}$,短轴半径 d_2 为 $20 \sim 24$ mm,长轴半径 d_1 为 $24 \sim 28$ mm。依据 Box - Behnken 中心组合设计理论进行试验设计,试验因素编码如表 1 所示。

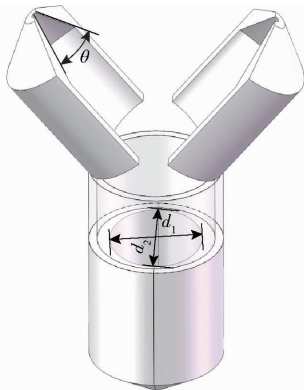


图 10 关键结构参数示意图
Fig. 10 Key structural parameters

表 1 试验因素编码
Tab. 1 Codes of test factors

编码	因素		
	接播装置底面夹角/($^{\circ}$)	短轴半径/mm	长轴半径/mm
-1	60	20	24
0	80	22	26
1	100	24	28

仿真试验方案与结果如表 2 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值,运用 Design-Expert 11. 1. 2. 0 数据分析软件进行多元回归拟合分析,得到直立率 Y 的回归方程为

$$Y = 95.2 - 1.125X_1 + 3.063X_2 + 1.438X_3 + 4.25X_2X_3 - 2.6X_1^2 - 6.975X_2^2 - 1.975X_3^2$$

(6)

任意 2 个因素相互作用对直立率的影响如

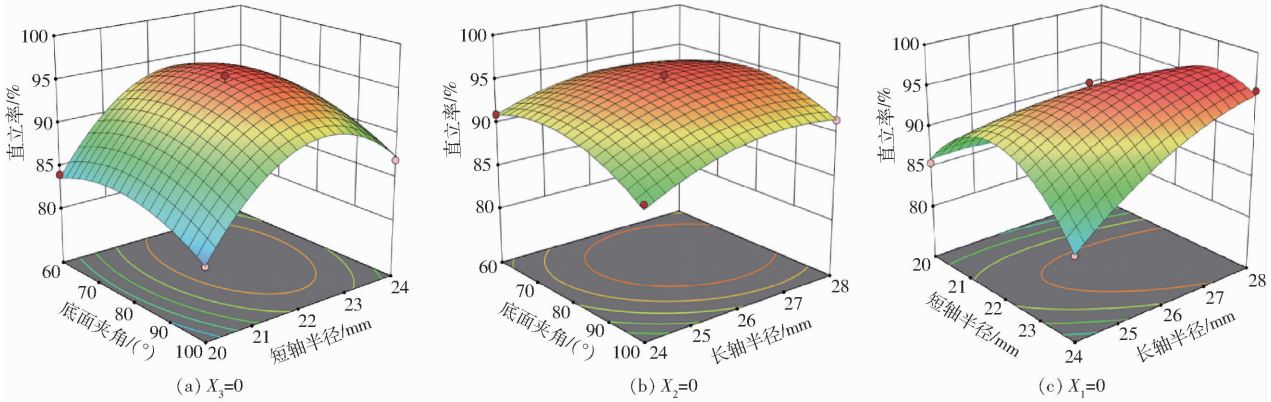


图 11 各因素对直立率影响的响应曲线

Fig. 11 Effects of interactive factors on rate of uprightness

表 2 试验方案及结果

Tab. 2 Experiment design and results

序号	因素			直立率 $Y/\%$
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	0	84.0
2	1	-1	0	81.5
3	-1	1	0	90.0
4	1	1	0	87.0
5	-1	0	-1	91.0
6	1	0	-1	88.0
7	-1	0	1	92.0
8	1	0	1	91.5
9	0	-1	-1	85.5
10	0	1	-1	83.5
11	0	-1	1	80.5
12	0	1	1	95.5
13	0	0	0	95.0
14	0	0	0	96.0
15	0	0	0	94.5
16	0	0	0	96.0
17	0	0	0	94.5

图 11 所示。由图 11a 可知,随接播装置底面夹角增加,直立率先升后降;随短轴半径增加,直立率先升后降。由图 11b 可知,随长轴半径增加,直立率先升后降,且影响效果不及短轴半径显著。由图 11c 可知,接播装置底面夹角一定时,单方面减小短轴半径或长轴半径时,直立率下降较快,但同时减小两半径时,直立率下降较为平缓,由此可知,长轴半径与短轴半径交互作用明显。

3.1.3 参数优化与试验验证

为确定接播装置的最优结构参数,以直立率 Y 最高为目标函数,以接播装置底面夹角 X_1 、短轴半径 X_2 、长轴半径 X_3 为约束条件,建立接播装置结构参数优化模型

$$\begin{cases} \max Y \\ -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases}$$

(7)

利用 Optimization Numerical 模块进行优化,得到直立率 Y 最佳参数组合为:接播装置底面夹角为 80° ,短轴半径为 22.99 mm,长轴半径为 27.79 mm。经计算,模型预测的直立率 Y 为 96.6%。考虑结构加工要求,对优化参数进行圆整,取接播装置底面夹角为 80° ,短轴半径为 23 mm,长轴半径为 28 mm。为验证优化结果准确性,在相同条件下重复 3 次物理试验,取平均值作为试验值,得到直立率为 97.3%,试验结果与理论预测结果一致。

3.2 电容检测装置及信号采集方法优化

信号检测及传递的过程中,由于外界电磁噪声及装置振动干扰,最终获取的检测信号带有一定偏差,减小偏差影响对提高检测精度具有重要意义。由上述分析可知,信噪比越高,即信号传递过程中的电容变化量与噪声导致的电容变化量比值越大,则信号传输过程中所受干扰占比越小,信号质量越好。为提高信号质量,可通过提高信号值或降低噪声实现。

3.2.1 极板尺寸优化

极板面积对信噪比存在影响,极板面积越大接收的有用信号越多,干扰信号也越大。为获得最佳的信噪比,需确定合理的极板宽度。依据蒜种的尺寸分布^[23]及正态分布数据特征,取 $\mu - 3\sigma$ 、 μ 、 $\mu + 3\sigma$ 作为基准长度,依据大蒜形态取基准长度的 1/4 作为极板长度;根据铜箔与装置的贴合性及耐用度,设置极板厚度为 0.1 mm。模拟现实工作环境,设计如下物理试验:在振动频率为 0 Hz(无干扰)、1 000 Hz(干扰)环境下,分别测量同一蒜种在大(45 mm × 10 mm × 0.1 mm)、中(45 mm × 8 mm × 0.1 mm)、小(45 mm × 6 mm × 0.1 mm)面积铜箔中信噪比变化情况。

如表 3 所示,通过测量无干扰状态和干扰状态下有用信号波动范围与噪声波动范围,获得了信噪比。无干扰状态下,信噪比随面积的减小先增大后减小,中等面积的电容板获得了最优的检测数据,且明显优于小面积电极板;在干扰状态下,信噪比随极板面积减小而减小,最大面积的电容板获得了最优的检测数据,且不同电极板的信噪比差距明显。在干扰状态下,极板面积会对最终结果产生显著影响。实际情况下,机器运动必然产生振动干扰,从这个角度出发,应选用面积大的电极板,但由于蒜种形态的限制,过大面积的电容板会遮盖掉蒜种形态本身的差异性,参考蒜种结构特点及试验数据,最终极板尺寸选择为 45 mm × 8 mm × 0.1 mm。

3.2.2 信号采集方法优化

电容检测装置获取一次电容数据记作一次采

表 3 不同状态下信号检测结果

Tab. 3 Signal detection results in different states

外界干扰状态	参数	极板面积		
		大	中	小
无	$\Delta C_s/\text{pF}$	0.07	0.06	0.04
	$\Delta C_n/\text{pF}$	0.000 1	0.000 1	0.000 1
	$10\lg(\Delta C_s/\Delta C_n)$	28.45	27.78	26.02
有	$\Delta C_s/\text{pF}$	0.15	0.8	0.05
	$\Delta C_n/\text{pF}$	0.000 3	0.000 2	0.000 2
	$10\lg(\Delta C_s/\Delta C_n)$	26.99	26.02	23.98

样。如图 12a 所示,采样次数为 50 左右,蒜种检测装置由初始空状态(状态 0)逐渐变为鳞芽朝上(状态 1),检测装置获得的电容变大;横坐标为 200 次左右,蒜种检测装置由鳞芽朝上变为须根朝上(状态 2),检测装置获得的电容变小。由图 12a 还可以看出,在状态 1 向状态 2 变化的过程中,由于装置转动,蒜种在接播装置中的位姿会发生剧烈变化,检测装置获得的电容信号出现较大波动。

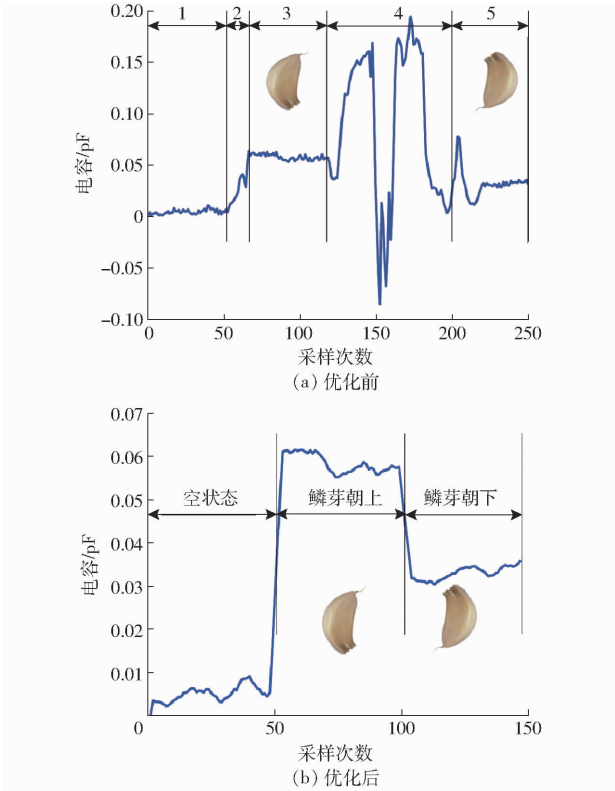


图 12 优化前后电容变化量曲线

Fig. 12 Comparison diagrams of capacitance change curve
1. 空状态 2. 蒜种下落状态 3. 鳞芽朝上 4. 舵机翻转 5. 鳞芽朝下

接播装置翻转过程中产生的振动干扰信号,有效信息量较少且干扰性较强,在分析过程中会引入较大的误差,在不影响系统检测效果的前提下,将检测方法做以下改进:①滑动平均处理,向前取 5 次采样值,计算 5 点平均值作为最终取值。②设置波动

阈值为 0.02 pF,状态未发生变化且外界干扰超出阈值范围,舍弃该次数据。③装置转动导致电容数据大幅波动,初始状态检测完成后,暂停接收电容数据,蒜种须根端落入蒜种检测装置并达到稳定后,向控制系统发送信号,重新获取检测数据,得到状态 1 的数据。④状态 1 检测完成后,停止接收,舵机转动,等待蒜种稳定后,重新获取检测数据,得到状态 2 的数据。

经过该方案优化后的数据采集结果如图 12b 所示,将上述两个环节的数据进行对比,可以发现去除干扰后的电容数据波动范围小且不同状态有明显的差异性,数据的信噪比显著提高,因此方案具有可行性。

4 台架试验

为验证基于电容检测技术的蒜种鳞芽扶正装置的作业效果,于 2022 年 5 月在山东农业大学开展了台架试验。

4.1 试验对象

为提高试验可靠性,选取金乡大蒜、苍山大蒜两个品种,每种大蒜选取大、中、小各 10 粒,共 60 粒蒜种。

4.2 过程与结果

搭建试验台,如图 13 所示,使用育苗盘模拟农田环境,将 60 颗蒜种按照分级分别进行播种试验。图 14 为蒜种鳞芽扶正装置的具体结构,接播装置底面夹角为 80°,接播装置短轴半径为 23 mm,长轴半径为 28 mm,电容采集装置电极板设置为铜箔,电容数据通过 FDC2214 电容传感器芯片进行采集,计算处理装置为 STM32F407,定向翻转装置动力源为 SPT5535 舵机。

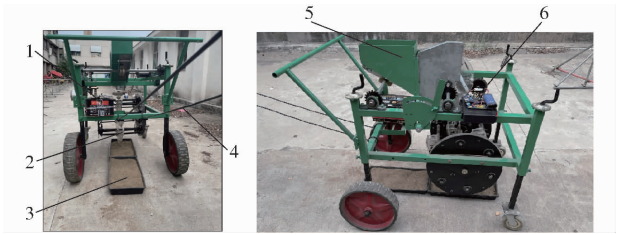


图 13 试验台
Fig. 13 Test bench

1. 移动电源 2. 插播装置 3. 土槽 4. 绞盘 5. 排种装置 6. 蒜种鳞芽检测与扶正装置

装置工作流程如下:单粒取种装置取种后,蒜种鳞芽检测与扶正装置通过舵机驱动实现第一接播装置开口,接取蒜种后进行检测,通过对比两个状态下的电容变化量实现蒜种定向及扶正操作。定向完成后,插播装置与下端挡板作用,实现下端开口,完成

蒜种投放。

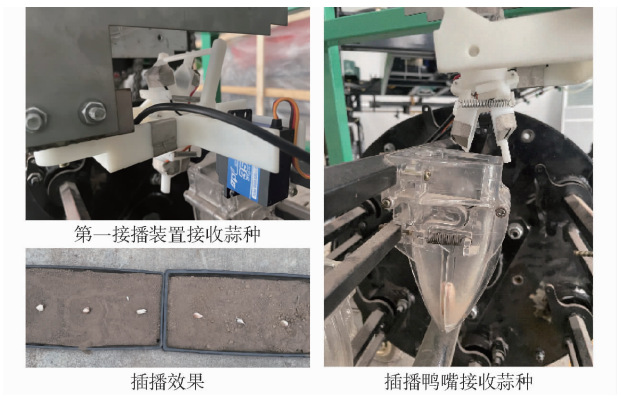


图 14 关键部件及播种效果
Fig. 14 Key components and seeding effect

4.3 试验结果分析

按照蒜种级别分类,检测电容传感器处于鳞芽朝上(状态 1)、须根朝上(状态 2)的电容,初始状态电容作为参考值(初始化为 0),具体数值如图 15 所示。蒜种“鳞芽朝上”时蒜种在极板间的体积较大,蒜种落入后的平均介电常数大于空状态的平均介电常数,电容极板检测的电容增加;蒜种“须根朝上”时,蒜种在极板间的体积较小,电容极板检测的电容相较于“鳞芽朝上”时减小。由图 15 可知,蒜种在两种状态下的电容数据具有明显差异,可实现对蒜种位姿状态的判定。

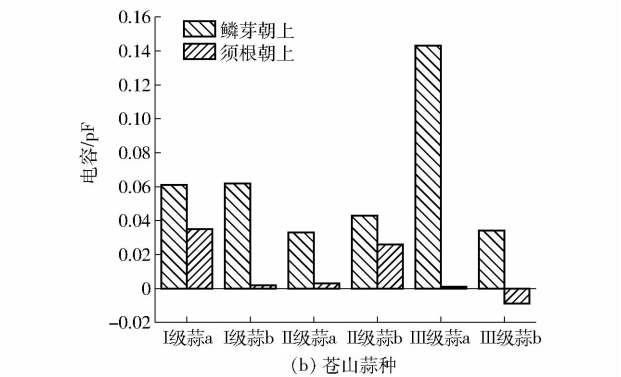
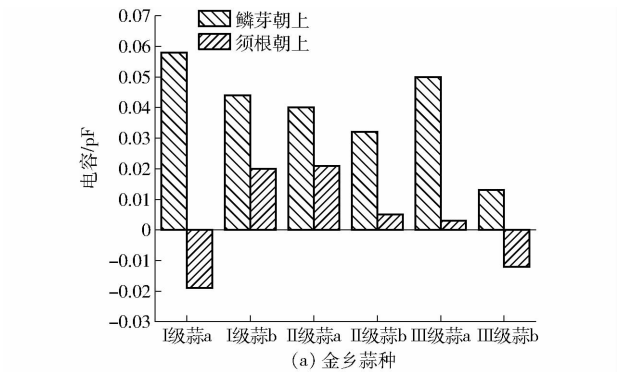


图 15 各类蒜种的电容试验值
Fig. 15 Capacitance of different garlic species

为进一步验证装置可靠性,增加试验对象,将金乡、苍山蒜种混合后,随机选取 200 粒蒜种进行播种

试验,最终正芽率为 95.0%。相关试验数据表明,该装置满足大蒜播种要求。

4.4 误差分析

蒜种检测过程中,部分特殊形态蒜种会出现位姿不理想的问题。金乡 3 号蒜种“尾部”由于生长过程中的挤压,尾部异常,在检测过程中存在较大干扰,但该蒜种整体数量占比较少。相较于普通蒜种,苍山 1 号蒜种体积过大,下落时有一定几率被卡住,造成检测误差,在机械结构优化过程中已做处理。两类蒜种的 6 号蒜,都存在体积过小,下落时可能出现大角度倾斜甚至“平躺”问题,该情况会导致不同状态下的电容数据差异不明显,但该类蒜种由于营养物质含量少,后期发育不理想,一般不做蒜种使用。

根据前文分析,蒜种进入接播装置后,由于蒜种的介电常数大于空气的介电常数,因此两种状态下的电容相较于初始状态时都应该有所提高。由图 15 发现,蒜种鳞芽端朝下时,电容在某些情况下出现了小于初始状态电容的情况。为此,在初始状态、状态 1 电容、状态 2 电容测量完成后,又重新测量了空状态电容,记为 C_3 ,以金乡 1 号蒜为例,测量结果为 -0.038 pF 。可以看出,重新测量的空状态电容低于蒜种鳞芽端朝下时的电容,符合对电容变化情况的分析。该现象出现的原因可能与舵机转动

和位置变换有关,但此处的电容变化未影响到最终的判定效果,方案仍然可行。

5 结论

(1)提出了一种基于电容检测的蒜种鳞芽定向方法。该方法基于蒜种鳞芽端与须根端的形态差异,将其转换为电容差异,从而实现蒜种方向判定。通过仿真分析软件 ANSYS Electronics Desktop(2019 R2)对蒜种下落过程的空间电容传感器进行仿真分析,验证了方法的可行性。

(2)设计了鳞芽检测与扶正装置,基于 EDEM 仿真软件进行仿真分析和结构优化,确定最优结构参数为接播装置底面夹角 80° ,短轴半径 22.99 mm ,长轴半径 27.79 mm ,模型预测的直立率为 96.6% 。对影响电容信号质量的极板面积进行优化,最终确定最佳的极板尺寸为 $45\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$;对电容采集信号存在的干扰源进行分析,对信号采集模式进行了优化,数据的信噪比得到显著提高。

(3)开展了台架试验。将金乡、苍山蒜种混合,随机选取 200 粒蒜种进行播种试验,最终正芽率为 95.0% ,结果表明该装置满足大蒜播种要求,研究结果可为电容检测技术在精密播种设备中的应用提供技术支持。

参 考 文 献

[1] 刘静. 不同大蒜品种及鳞芽播种朝向对生长特性与品质的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2018.
LIU Jing. Effects of different garlic varieties and bulbil seeding directions on growth characteristic and quality[D]. Taian: Shandong Agricultural University,2018. (in Chinese)

[2] SUI F,YANG Y,ZHAO S. What affects the production technology of labor-intensive agricultural industries in the context of labor aging? An empirical study based on the garlic production in Lanling[J]. Sustainability,2020,14(1):48.

[3] 侯加林,黄圣海,牛子儒,等. 双鸭嘴式大蒜正头装置调头机理分析与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(11):87-96.
HOU Jialin,HUANG Shenghai,NIU Ziru,et al. Mechanism analysis and test of adjusting garlies upwards using two duckbill devices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(11):87-96. (in Chinese)

[4] 耿爱军,栗晓宇,侯加林,等. 自动定向大蒜播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(11):17-25.
GENG Aijun,LI Xiaoyu,HOU Jialin,et al. Design and experiment of automatic directing garlic planter[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(11):17-25. (in Chinese)

[5] 文恩杨,吴彦强,李天华,等. 牵引式大蒜播种机的设计[J]. 农机化研究,2020,42(1):96-100.
WEN Enyang,WU Yanqiang,LI Tianhua,et al. Design of traction garlic sowing machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2020,42(1):96-100. (in Chinese)

[6] GENG A,LI X,HOU J,et al. Design and experiment of automatic garlic seed directing device[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2020,13(6):85-93.

[7] LI Y,WU Y,LI T,et al. Design and experiment of adjustment device based on machine vision for garlic clove direction[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2020,174:105513.

[8] 周利明,李树君,张小超,等. 基于电容法的棉管籽棉质量流量检测[J]. 农业机械学报,2014,45(6):47-52.
ZHOU Liming,LI Shujun,ZHANG Xiaochao,et al. Detection of seedcotton mass flow based on capacitance approach[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(6):47-52. (in Chinese)

[9] 王金武,汤天永,唐汉,等. 联合收获机电容式稻谷含水率在线检测装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(3):143-152.
WANG Jinwu,TANG Tianyong,TANG Han,et al. Design and experiment of on-line detection device for capacitive paddy rice moisture content of combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(3):143-152. (in Chinese)

- [10] 李晋阳,毛罕平. 基于阻抗和电容的番茄叶片含水率实时监测[J]. 农业机械学报,2016,47(5):295–299.
LI Jinyang,MAO Hanping. Monitoring of tomato leaf moisture content based on electrical impedance and capacitance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(5):295–299. (in Chinese)
- [11] 周利明,马明,苑严伟,等. 基于电容法的施肥量检测系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(24):44–51.
ZHOU Liming,MA Ming,YUAN Yanwei,et al. Design and test of fertilizer mass monitoring system based on capacitance method[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(24):44–51. (in Chinese)
- [12] 刘艳芝. 大蒜生长特性与产量形成分析[D]. 泰安:山东农业大学,2012.
LIU Yanzhi. The analysis of garlic growth characteristics and yield formation[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [13] WU C,WANG M,DONG Y,et al. Growth, bolting and yield of garlic (*Allium sativum* L.) in response to clove chilling treatment[J]. Scientia Horticulturae,2015,194:43–52.
- [14] OMARI E A,VARGHESE T. Signal to noise ratio comparisons for ultrasound attenuation slope estimation algorithms[J]. Medical Physics,2014,41(3):032902.
- [15] 谢东波,张春岭,吴晓庆,等. 扰种齿辅助气吸式大蒜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):47–57.
XIE Dongbo,ZHANG Chunling,WU Xiaoqing,et al. Design and test of garlic seed placer with seed disturbing tooth assisted air suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(2):47–57. (in Chinese)
- [16] 侯加林,刘全程,李天华,等. 双充种室大蒜单粒取种装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(14):21–32.
HOU Jialin,LIU Quancheng,LI Tianhua,et al. Design and experiment of the garlic seed metering device with double seed-filling chambers[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(14):21–32. (in Chinese)
- [17] 孙伟,冯江,蒋亦元. 非圆齿轮系大蒜直立移栽机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(8):73–82.
SUN Wei,FENG Jiang,JIANG Yiyuan. Optimal design and experiment of vertically transplanting mechanism with non-circular gears system for garlic (*Allium Sativum* L.)[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(8):73–82. (in Chinese)
- [18] 何岳平,陈青春,何瑞银,等. 大蒜栽植机栽植系统优化设计与运动分析[J]. 农业机械学报,2011,42(2):88–93.
HE Yueping,CHEN Qingchun,HE Ruiyin,et al. Optimal design and kinematic analysis for planting system garlic planting machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(2):88–93. (in Chinese)
- [19] 魏宏玲,王小瑜,陈进熹,等. 中国大蒜机械化生产现状与发展思路探讨[J]. 中国农机化学报,2022,43(4):175–182.
WEI Hongling,WANG Xiaoyu,CHEN Jinxi,et al. Discussion on the present situation and development of mechanized garlic production in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2022,43(4):175–182. (in Chinese)
- [20] 潘宇翔. 传感器差分电容检测电路的设计[D]. 成都:电子科技大学,2020.
PAN Yuxiang. Areadout circuit for differ ential capacitive sensor[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China,2020. (in Chinese)
- [21] CUI Z,WANG H,YIN W. Electrical capacitance tomography with differential sensor[J]. IEEE Sensors Journal,2015,15(9):5087–5094.
- [22] VAN LIEDEKERKE P,TIJSKENS E,DINTWA E,et al. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader [J]. Powder Technology,2009,190(3):348–360.
- [23] 李玉华,张智龙,李天华,等. 轮勺式大蒜单粒取种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(3):61–68.
LI Yuhua,ZHANG Zhilong,LI Tianhua,et al. Design and experiment of wheel-spoon type garlic precision seed-picking device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(3):61–68. (in Chinese)