

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.07.017

一体式蔬菜钵苗取苗爪夹持力检测传感器设计与试验

金鑫^{1,2} 索宏斌¹ 张恒毅¹ 姬江涛^{1,3} 张博¹ 林诚¹

(1. 河南科技大学农业装备工程学院, 洛阳 471003; 2. 龙门实验室成套装备科技创新中心, 洛阳 471003;
3. 河南省机械装备先进制造协同创新中心, 洛阳 471003)

摘要: 针对入钵夹取式全自动蔬菜钵苗移栽机取苗爪体积小, 夹持力检测传感器结构与安装方式干涉取苗爪正常取投动作、影响自身精度与使用寿命等问题, 本文选用聚二甲基硅氧烷 (Polydimethylsiloxane, PDMS) 薄膜作为传感器介电层, 设计了一种内置式钵苗夹持力传感器, 并通过嵌入方式实现取苗爪与传感器一体化设计。建立穴孔、钵体基质、取苗爪仿真模型, 应用 LS-PrePost 软件对取苗过程进行耦合仿真, 得到取苗爪与钵体基质接触部位最大受力区域, 确定了取苗爪与传感器的结构与尺寸; 设计夹持力信号检测系统, 将硬件电路与采集软件结合, 完成电容量-电压转换、信号放大、噪声滤除, 实现夹持力信号的采集、处理、显示与保存等功能。为验证传感器性能, 进行传感器标定试验与室内验证试验。标定试验表明, 在不同振荡频率下, 夹持力传感器平均灵敏度为 0.372 8 N/V, 平均线性决定系数为 0.989 2, 精度为 7.548%, 量程为 7 N, 满足移栽过程中夹持力检测的准确度要求; 室内验证试验表明, 夹持力检测传感器具有良好的稳定性与适应性, 可用于移栽机取苗机构夹持实时精准检测。

关键词: 蔬菜钵苗移栽机; 夹持力检测; 内置式传感器; 一体化设计

中图分类号: S24; S223.92

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)07-0175-09

OSID:



Development and Experiment of Integrated Vegetable Pot Seedling Picking Jaw Clamping Force Detection Sensor

JIN Xin^{1,2} SUO Hongbin¹ ZHANG Hengyi¹ JI Jiangtao^{1,3} ZHANG Bo¹ LIN Cheng¹

(1. College of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China
2. Science and Technology Innovation Center for Completed Set Equipment, Longmen Laboratory, Luoyang 471003, China
3. Collaborative Innovation Center of Machinery Equipment Advanced Manufacturing of Henan Province, Luoyang 471003, China)

Abstract: In order to solve the problems of small size of seedling picking jaws of automatic vegetable pot transplanting machine, the structure and installation method of picking force detection sensor interferes with the normal picking action of picking jaws and affects its accuracy and service life, selecting polydimethylsiloxane (PDMS) film as the dielectric layer of sensor and a built-in pot picking force sensor was developed. The PDMS film was selected as the dielectric layer of the sensor, and a built-in potting force sensor was developed. Firstly, a simulation model of cavity, pot substrate and seedling jaw was established, and LS-PrePost software was applied to simulate the coupling of seedling extraction process, obtain the maximum force area in the contact area between seedling jaw and pot substrate, and determine the structure and size of seedling jaw and sensor; the clamping force signal detection system was designed, and the hardware circuit and acquisition software were combined to complete the capacitance-voltage conversion, signal amplification, noise filtering, and realize the acquisition of clamping force signal. In order to realize the functions of acquisition, processing, display and storage of the gripping force signal, the system was designed. In order to verify the performance of the sensor, calibration test and indoor validation test were conducted; the calibration test showed that the average sensitivity of the clamping force sensor was 0.372 8 N/V, the average linear coefficient of determination

收稿日期: 2023-03-22 修回日期: 2023-04-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001205)、河南省自然科学基金优秀青年基金项目(202300410124)和河南省高校科技创新团队项目(23IRTSTHN015)

作者简介: 金鑫(1986—),男,副教授,博士,主要从事种苗高速栽插装备与农机状态检测技术研究,E-mail: jx.771@163.com

通信作者: 姬江涛(1965—),男,教授,博士,主要从事智能农业装备和农业信息技术研究,E-mail: jjt0907@163.com

was 0.989 2, the accuracy was 7.548%, and the range was 7 N, which satisfied the accuracy requirement of clamping force detection in the transplanting process; the indoor validation test showed that the clamping force detection sensor had good stability and adaptability, and can be used for real-time and accurate detection of the clamping of transplanting machine pick-up mechanism.

Key words: vegetable pot transplanter; clamping force detection; embedded sensor; integrated design

0 引言

钵苗夹持力是指移栽机作业过程中取苗爪对穴盘钵体基质的作用力,是决定钵体破损率与取苗成功率的关键因素^[1]。现有的移栽取苗机构多采用纯机械夹紧方式,缺少对取苗夹持力的感知与检测^[2]。移栽过程中受穴盘苗品种、生长状况以及移栽机稳定性等因素影响,容易导致钵苗夹持力发生改变,出现穴盘苗钵体破损、散坨、漏栽等问题^[3-5]。同时,传感器结构与安装方式易造成夹持力变化,影响取苗爪正常取投动作与传感器自身精度及使用寿命^[6-8]。因此,开展传感器检测与取苗爪作业互适性研究,在实现夹持力检测不干涉取苗爪正常工作的同时,可为后续移栽机末端执行器反馈控制研究提供技术支撑,对全自动蔬菜钵苗移栽机智能升级与低损高效作业具有重要意义。

为提高钵苗移栽质量,国内外相关人员做了大量有益探索与研究,相继出现了一些夹持力检测方法 与装置。TING 等^[9]采用电容式位移传感器检测夹持机构对钵苗施加的夹持力,但检测精度低、灵敏度差;COTTON 等^[10]将压电陶瓷作为敏感元件,通过计算传感器与接触物体间的摩擦因数,检测并调节执行机构施加果蔬上的夹持力。周俊等^[11]用压敏电阻作为敏感材料制作了一种灵敏的触觉传感器,用于感知果蔬抓取过程中的力。崔玉国等^[12]提出用电阻应变片来检测钳指的夹持力,采用柔性杠杆放大机构,实现了微小夹持力的测量。JIANG 等^[13]将拉力与压力传感器集成在四针夹爪取苗末端执行器上,测定并分析了穴盘与末端执行器对钵体基质的粘附力与夹持力。王俊等^[14]利用压电效应将夹持力转化为电荷量,通过将 PVDF 压电薄膜粘贴在右取苗爪内侧表面的方式,实现了取苗爪对苗钵夹持力的实时监测。刘双斌等^[15]对绝缘硅橡胶填充纳米导电填料制备出压敏硅橡胶,实现压力数值与范围的检测。LI 等^[16]基于线性霍尔元件研制了一种夹茎秆式末端执行器,通过与取苗爪连接的弹性致动片产生类悬臂梁弯曲转化为霍尔传感器的电压变化,实现对夹持力的检测。在已有相关文献中,对夹持力检测多集中于果蔬采摘领域,其末端执行器作业速度慢,传感器安装空间大,作业对象相

对穴盘苗较大。针对蔬菜钵苗移栽机夹持力检测,多通过机构设计与优化并配套检测装置实现夹持力检测,少有对夹持力检测传感器与取苗爪作业过程的互适性研究。

基于上述研究,针对取苗爪体积小,夹持力检测传感器结构与安装方式干涉取苗爪正常取投动作等问题,本文以 PDMS 薄膜为介电层,设计一种内置式钵苗夹持力检测传感器,并采用嵌入方式与取苗爪一体化封装,通过传感器性能标定试验与室内取苗试验,验证夹持力传感器的稳定性与适应性。

1 取苗爪结构设计

1.1 研究对象

本文以入钵夹取式全自动蔬菜钵苗移栽机取苗爪为研究对象,以取苗爪正常完成取投动作的同时实现夹持力检测为目标,对移栽机取苗爪作业过程进行分析。取苗移栽机部件及取苗爪如图 1 所示。取苗过程为:穴盘运动到取苗爪夹取位置后,固定在凸轮上的取苗机构带动取苗爪运动,取苗爪由初始竖直状态变为前伸状态,插入穴孔并夹紧穴盘苗钵体基质,之后随轮系旋转将钵苗带出并投放至鸭嘴漏斗,取苗爪由前伸状态变为竖直状态,准备下一次夹取动作,如此循环,完成取投苗作业。

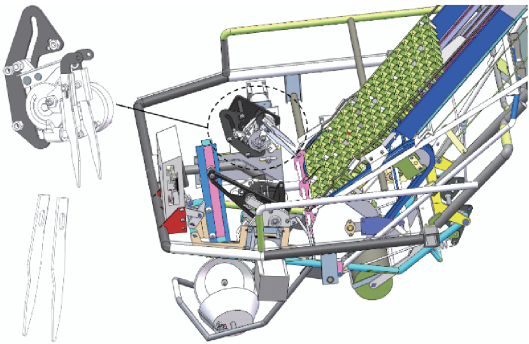


图 1 取苗移栽机部件示意图

Fig. 1 Diagram of parts of seedling transplanter

1.2 钵苗夹持力受力分析

分析取苗爪夹持钵体基质受力情况,可为传感器安装位置提供参考。不考虑钵体的蠕变及不均匀性,取苗过程中钵体基质受力状况如图 2 所示。其中 $F_{\beta 1}$ 、 $F_{\beta 2}$ 为取苗爪对钵体基质的夹持力, $F_{\beta 1}$ 、 $F_{\beta 2}$ 为取苗爪对钵体基质的摩擦力, $F_{\beta 3}$ 、 $F_{\beta 4}$ 为钵穴与钵体基质间的摩擦力, F_{N1} 、 F_{N2} 为钵体基质与钵穴间切向

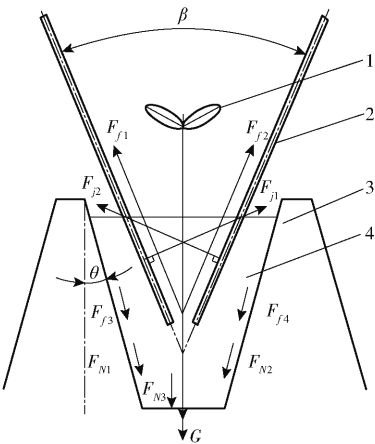


图 2 取苗过程钵体受力分析

Fig. 2 Analysis of forces on pot during seedling retrieval
1. 钵苗 2. 取苗爪 3. 穴盘 4. 钵体基质

粘附力, F_{N3} 为钵体基质与钵穴间法向粘附力, G 为钵体基质自身重力, β 为夹持角度。为简化计算, 将钵体基质在竖直向下的合力定义为 F_H , 则 F_H 满足

由于取苗爪径向尺寸较小且外表比较光滑, 对钵体基质的内聚力影响较小, 忽略取苗过程中取苗爪对钵体基质损失率的影响。为保证取苗成功, 钵体基质在竖直方向上的合力必须满足

$$F_H = (F_{f3} + F_{f4} + F_{N1} + F_{N2}) \cos \theta + F_{N3} + G \quad (1)$$

F_j 表示不同位置钵体基质对取苗爪的作用力, 方向与接触面垂直, 计算式为

$$F_j = \sigma_j A \quad (3)$$

式中 σ_j ——取苗爪不同位置处抗压强度, kPa

A ——钵体基质的夹持受力面积, mm^2

在计算中, 一般将取苗爪对钵体基质的夹持力简化为 F_{j1} 、 F_{j2} , 在取苗爪夹紧过程中, 钵体基质的压缩量随着取苗爪插入深度的增加而增大, 相应的取苗爪测力区域与钵体基质不同接触位置夹持力也不同, 传感器无法准确输出所需的夹持力。为此, 提出一种内置式电容夹持力检测传感器, 采用嵌入方式与取苗爪一体化封装, 通过表面保护层盖板, 将取苗爪测力区域受力平均分散在整个盖板上, 使接触区域下压距离相同, 传感器输出准确一致的夹持力, 有效解决了因取苗爪测力区域不同位置夹持力不一致导致传感器无法输出有效值的问题。

1.3 取苗过程耦合仿真

针对夹持力受力分析的局限性, 为使夹持力检测更加精准, 对取苗过程进行柔性体-离散元耦合仿真, 利用 SolidWorks 对取苗爪、穴盘进行建模, 将取苗爪导入 ANSYS LS-PrePost 中进行网格划分, 通过 EDEM 对钵体基质建模, 通过 LS-Dyna 软件对

取苗过程进行柔性体-离散元耦合仿真, 进而得到取苗爪与钵体基质受力云图, 仿真材料参数如表 1 所示。

表 1 EDEM 离散元仿真材料参数
Tab.1 EDEM discrete element simulation material parameters

参数	材料		
	取苗爪	钵体基质	穴盘
泊松比	0.35	0.3	0.38
剪切模量/MPa	8 300	1.55	850
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 700	800	1 500

其中, 钵体基质建模过程中, 由于钵体基质颗粒模型均为球形且半径相差小, 为方便模拟并减少计算量, 统一将基质颗粒尺寸半径定为 0.5 mm, 根据 128 穴盘尺寸设置相应的 Total Mass, 由 Factory 生成基质颗粒并在重力作用下落入穴孔中, 设置颗粒间接触模型为 EEPA 模型, 之后对模型额外施加压板压缩颗粒使基质颗粒间生成连接键, 最终得到钵体颗粒模型。钵体夹取仿真模型如图 3 所示。

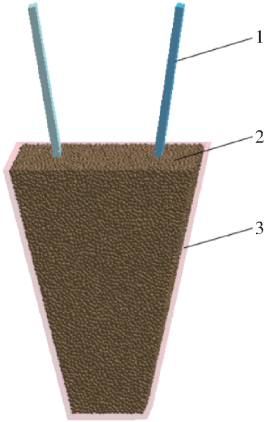


图 3 钵苗夹取仿真模型

Fig. 3 Potted seedling clamping simulation model

1. 取苗爪 2. 钵体基质 3. 穴孔

仿真模拟取苗爪插入基质及将基质整体带出两个主要过程。如图 4 所示, 通过求解得到插入过程与提取过程中取苗爪与钵体基质的受力云图。

由仿真模拟取苗爪插入基质并将基质整体带出两个主要过程可知, 夹取过程中取苗针与钵体基质接触部分最大受力区域为距尖端 10 ~ 15 mm 以上的长形区域, 该区域是嵌入传感器的最佳位置。

1.4 取苗爪结构参数设计

根据取苗爪与钵体基质间受力分析以及取苗过程夹持力仿真模型分析, 设计在取苗爪距离入土尖端 15 mm 处开槽, 开槽部分尺寸为 6 mm × 26 mm, 深 1.5 mm。根据栽植要求, 取苗过程中取苗爪插入钵体基质的深度为 35 ~ 40 mm, 因此, 本设计可保证取苗爪插入钵体基质时, 传感器与钵体基质完全接触。此外, 取苗爪预留布线槽, 布线槽深度 0.2 mm, 以便

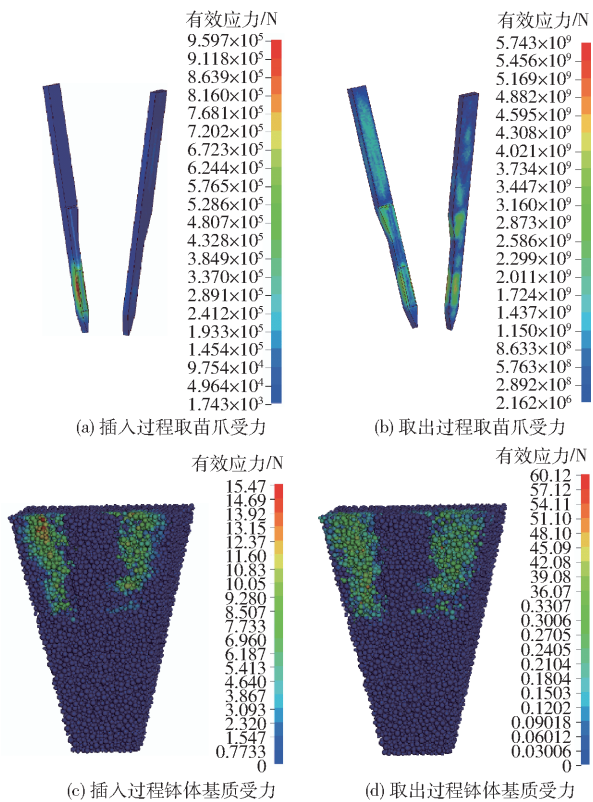


图 4 插取过程取苗爪与钵体基质仿真应力云图
Fig. 4 Simulated stress cloud of seedling jaws and potting substrate during insertion

引出传感器导线,待布线完成后,使用环氧树脂胶将导线槽封闭。嵌入传感器式取苗爪三维结构和实物如图 5 所示。

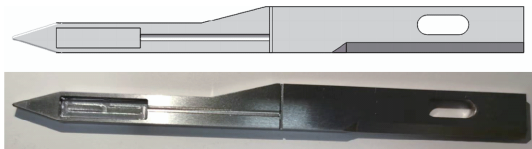


图 5 嵌入传感器式取苗爪三维结构与实物图
Fig. 5 Three-dimensional structure and physical drawing of sensor-embedded seedling picking claw

2 传感器原理设计

2.1 传感器测量原理

电容感知是机器触觉感知中最常用的原理之一,电容式传感器具有高灵敏度和高分辨率的特点,能够在机器振动、极端温湿度等较为恶劣的环境中保持良好的工作性能^[17-19]。现针对钵苗夹持力检测提出一种内置式电容传感器,利用其优良性能获取钵苗夹持力。电容式触觉传感器最常见的结构形式是 3 层结构,主要由上下极板和介电层组成,结构示意图如图 6 所示。

电容传感器的基本工作原理是基于被测物理量的变化可以转换为电容变化的这一特点。两极板间的距离发生微小变化时,将引起电容变化,通过对电

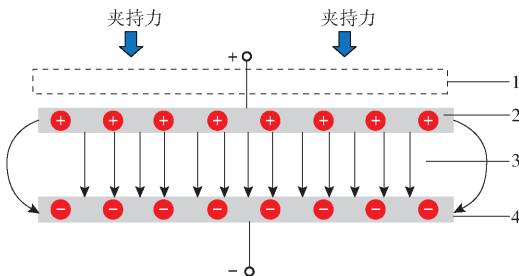


图 6 受压后电容传感器结构示意图
Fig. 6 Schematic of capacitive sensor structure under pressure

1. 上极板初始位 2. 上极板 3. 介电层 4. 下极板

容变化的转换来测量施加在传感器上的压力。平行板电容器的电容为

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \tag{4}$$

式中 ϵ_0 ——真空介电常数,F/m
 ϵ_r ——介电层相对介电常数,F/m
 A ——两极板间重叠面积, mm^2
 d ——两极板间距, μm

由式(4)可知,传感器电容变化主要由上下极板间重叠面积 A 与两极板间距 d 引起,由于本研究传感器采用嵌入式安装方式,极板间重叠面积始终保持不变,电容的变化主要通过外界施加压力使传感器极板间间距改变来实现。

2.2 传感器结构与封装

大量研究表明,对介电层进行微结构化处理是提高柔性压力传感器灵敏度等性能指标的有效方法之一^[20]。不同的微观结构和相对介电常数的介电层,对传感器的灵敏度和响应时间有很大的影响^[21-23]。对此,本研究选用具有较小杨氏模量与较大介电常数的 PDMS 材料,可降低传感器因初始电容小易受外界干扰的影响,传感器对外表现高灵敏度与小量程特性,适用于本研究对夹持力的测量。介电层设计 PDMS 圆台阵列结构,底部直径 100 μm ,顶部直径 30 μm ,高度 45 μm ,相邻圆台间隙 100 μm ,介电层整体尺寸为 5 mm $\times$ 25 mm。传感器介电层结构示意图如图 7 所示。

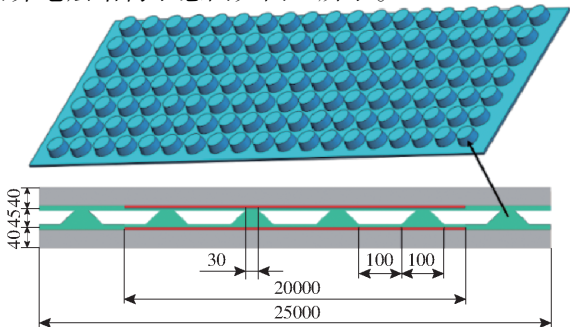


图 7 传感器介电层结构示意图
Fig. 7 Schematic of sensor dielectric layer structure

传感器由上下电极板与极板间介电层构成。上下电极板分别固定在柔性聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 薄膜上,通过垂直排列在传感器中形成电容器,电极板尺寸为 5 mm × 20 mm,介电层采用圆台式结构阵列的 PDMS 薄膜,取苗过程中,当取苗爪对钵体基质施加夹持力时,PDMS 介电层被压缩,两电极板之间的间距减小,电容增加。当钵苗夹持力发生变化时,PDMS 介电层被压缩的程度也随之改变。撤去钵苗夹持力时,PDMS 介电层由于其良好的弹性恢复形变。传感器微结构如图 8 所示。

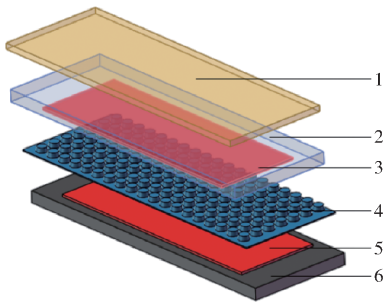


图 8 传感器结构示意图

Fig. 8 Schematic of sensor structure

1. 镍铬合金保护层盖板 2. 顶部 PET 薄膜 3. 顶部电极板 4. 介电层 5. 底部电极板 6. 底部 PET 薄膜

为实现取苗夹持力的检测,将传感器嵌入取苗爪开槽中,取苗爪与传感器一体化封装如图 9 所示,包括嵌入传感器式取苗爪、内置式电容传感器、镍铬合金保护层盖板等。其中,传感器尺寸为 5 mm × 25 mm,封装时对取苗爪开槽部分表面进行打磨,降低表面粗糙度对传感器精度的影响,传感器通过 KH502 胶水粘接在取苗爪内。为降低高温对传感器性能影响,采用冷焊工艺对保护层盖板与取苗爪进行焊接,最后采用环氧树脂胶对引出线部分进行密封处理,以提高整体的防尘、防水性能。

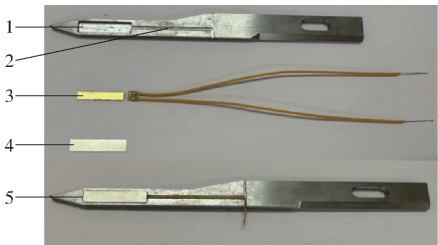


图 9 传感器与取苗爪一体化封装

Fig. 9 Integrated package of sensor and seedling jaw

1. 嵌入传感器式取苗爪 2. 导线槽 3. 内置式电容传感器 4. 保护层盖板 5. 一体化封装

3 夹持力传感器信号检测系统设计

3.1 信号采集硬件电路设计

由于表面保护层盖板及封装填充材料的影响,传感器在外力作用下输出信号较弱,取苗爪作业时

受机械振动、噪声信号干扰明显。为提高信噪比,设计了信号调理电路对传感器输出信号进行放大调理,信号调理电路主要包括频率电压转换模块、一级电压放大模块、二阶低通滤波模块、二级电压放大模块。同时,为降低因过多电阻、电容等传统元件搭建的信号调理电路带来的稳定性差、固有噪声多的问题,本电路采用功能型集成芯片与传统元件相结合的方式设计,主要包括 AD8052、INA826、OP07CD 及若干电阻、电容、二极管等。信号采集处理电路流程如图 10 所示。

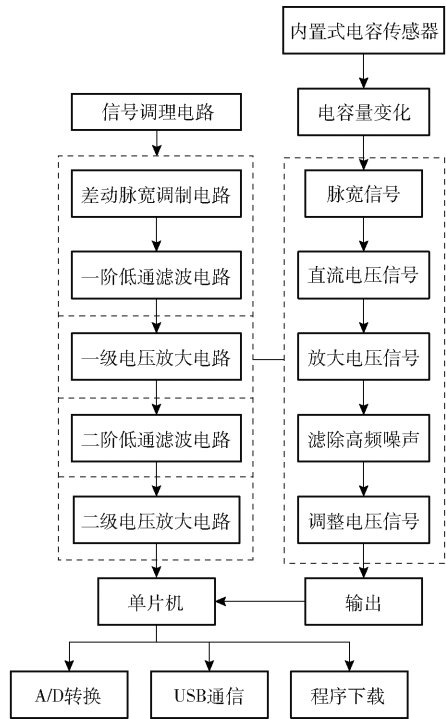


图 10 信号采集处理电路流程图

Fig. 10 Signal acquisition and processing circuit structure schematic

其中,频率电压转换模块主要由差动脉宽调制电路与一阶低通滤波电路组成。其中,基于运算放大器 AD8052 设计差动脉宽调制电路,主要作用是将电容传感器电容量变化转换为脉宽信号输出。一阶低通滤波电路主要由电阻与电容组成,将脉宽信号输入转换为直流电压信号输出;基于仪表放大器 INA826 设计了电压放大模块,通过共模抑制,消除了两个输入上具有相同电位的任何信号,实现对输入的直流电压信号放大,同时,将电容的高阻抗输入转换为低阻抗输出;通过电阻、电容搭建二阶低通滤波电路模块,实现对移栽机作业所产生高频噪声信号的滤除;为解决电路零飘与放大倍数过高导致输出信号失真的问题,基于 OP07CD 搭建了二级电压放大模块,在电路未接入传感器时,将逐级放大的无效信号调零,通过设置截止频率,控制放大倍数,完成对输出信号的优化。处理模块基于 Arduino 开发

板进行设计,核心处理器选用 ATMEGA168PA 单片机,配套设计串口通信、USB 通信、基准电压源电路,实现信号 A/D 转换、传输与程序下载等功能。对信号调理电路制板,实物图如图 11 所示。

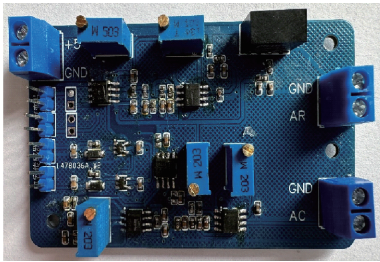


图 11 信号调理电路实物图

Fig. 11 Signal conditioning circuit physical diagram

3.2 信号采集软件设计

基于 LabVIEW 软件平台开发了信号采集软件,主要处理经硬件电路调理后的稳定电压,其工作流程主要分为数据分析、数据采集与数据保存 3 部分,数据分析前按需设置相关参数,数据采集后,按设定路径及文件格式对数据进行保存,同时通过交互界面实时显示传感器信号波形,并可对历史数据进行回放,信号采集软件交互界面如图 12 所示。



图 12 夹持力信号采集软件交互界面

Fig. 12 Clamping force signal acquisition software interactive interface

4 试验与结果分析

4.1 传感器性能标定试验

4.1.1 标定系统搭建

传感器标定系统主要由函数信号发生器、功率放大器、激振器、夹持力检测传感器、动态力薄膜传感器、动态力信号采集卡、信号调理硬件电路、信号采集软件、便携式计算机组成,标定系统结构框图如图 13 所示。

函数信号发生器设定输出正弦信号给功率放大器,调整功率放大器增益旋钮对信号进行放大使其具有带负载能力,实现对激振器的驱动控制,激振器接收到信号后产生对应幅度的振动,固定在取苗爪表面的动态力薄膜传感器用来检测激振器施加力值并通过动态力采集卡传输至计算机端信号采集软

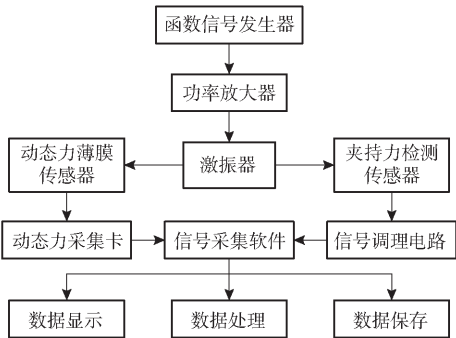


图 13 传感器标定系统结构框图

Fig. 13 Block diagram of sensor calibration system

件;同时,夹持力检测传感器受压后将输出的信号经信号调理电路处理后传输至计算机端信号采集软件,通过对记录的压力信号与电压信号进行拟合,得到校准系数,完成夹持力传感器的标定。传感器标定试验现场如图 14 所示。

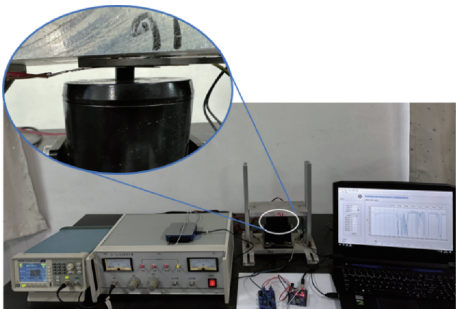


图 14 传感器标定试验现场图

Fig. 14 Sensor calibration test site diagram

函数信号发生器为上海广信友达实业有限公司生产的 AFG1022 型函数发生器,可设置输出不同频率的标准波形和任意波形;功率放大器为无锡世熬科技有限公司生产的 SA-PA010 型功率放大器;激振器采用无锡世熬科技有限公司生产的 SA-JZ00 型激振器,最大激振行程 6 mm,最大激振力 20 N;动态力薄膜传感器采用苏州能斯达电子科技有限公司生产的 SF15-54 型传感器,最大量程 100 N;数据采集卡采用上海澄科电子科技有限公司生产的 NI6002 型采集卡,可实现多路数据信号同时采集。

4.1.2 标定方法

内置式电容传感器标定试验过程中,设置信号发生器产生频率为 0.8、1、1.2 Hz 的正弦信号,分别代表取苗爪在取苗频率 40、50、60 株/min 下所受振荡频率,通过改变功率放大器增益使激振器顶杆上行距离变化,实现对夹持力传感器加载力的改变。本试验中,考虑到传感器量程及钵苗压实点范围^[24-25],在 0~7 N 范围加载,通过固定在取苗爪表面动态力薄膜传感器检测该压力,并通过数据采集卡采集传输至夹持力传感器检测系统,将该压力值

F/N 作为 X 轴,夹持力传感器将输出电压经信号 U/V 作为 Y 轴,在 3 种频率下依次进行 35 组试验,共采集 105 组数据。采用最小二乘法拟合得到 3 条不同频率下的标定曲线,如图 15 所示。

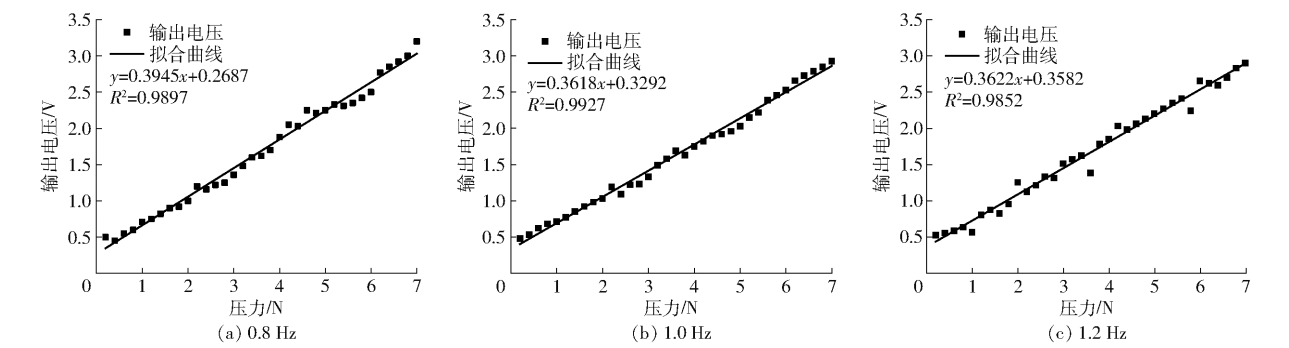


图 15 夹持力传感器标定曲线
Fig. 15 Clamping force transducer calibration curves

4.1.3 标定结果分析

(1)夹持力传感器测量范围
由夹持力传感器标定试验与相关钵体力学特性,得到传感器测量范围为 0 ~ 7 N,量程为 7 N;对应输出电压测量范围为 0 ~ 3.5 V,量程为 3.5 V。

(2)夹持力传感器灵敏度
传感器的灵敏度是指输出电压变化 Δy 对输入的变化量 Δx 之比,它是输出特性曲线的斜率,通常用 S 表示,其计算公式为

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \tag{5}$$

根据式(5)求得设计传感器在 0.8、1、1.2 Hz 的灵敏度分别为 0.394 5、0.361 8、0.362 2 V/N,平均灵敏度为 0.372 8 V/N。

(3)夹持力传感器精度
传感器精度 P 是指传感器在其量程范围内的最大误差与满量程输出百分比,计算公式为

$$P = \frac{\Delta A}{Y_{FS}} \times 100\% \tag{6}$$

式中 ΔA ——测量范围内最大绝对误差
 Y_{FS} ——传感器满量程夹持力

经分析计算,得到在频率 0.8、1、1.2 Hz 下夹持力传感器最大绝对误差分别为 0.146 2、0.264 2、0.191 5 V,传感器的满量程为 3.5 V,经式(6)计算得传感器的精度分别为 4.177%、7.548%、0.547%,则传感器精度为 7.548%。

拟合结果表明,所设计传感器在不同频率的力冲击下,线性决定系数分别为 0.989 7、0.992 7、0.985 2,平均线性决定系数为 0.989 2。由此可知,夹持力检测传感器所受压力与输出电压呈高度线性关系,且每次试验传感器灵敏度相差较小,证明传感器在设计测量范围内具有良好的稳定性与重复性。

4.2 传感器性能验证试验

对传感器标定完成后,为验证内置式夹持力传

感器稳定性与适应性,于 2023 年 2 月 10—15 日在全自动蔬菜钵苗移栽机试验台上进行取苗夹持力检测试验,试验现场图如图 16 所示。



图 16 夹持力检测室内试验现场
Fig. 16 Clamping force testing indoor test site

4.2.1 试验材料与设备

试验选用洛阳诚研辣椒研究所培育的烈焰 2 号辣椒苗,苗龄 45 d,苗高 8 ~ 12 cm;育苗盘采用 128 穴孔盘,穴盘整体尺寸为 540 mm × 280 mm,穴孔横截面为正方形,纵截面为倒梯形,上口径 32 mm,下口径 13 mm,高度 42 mm;穴盘基质主要成分草炭、蛭石、珍珠岩按照配比 6:3:1 混合,钵体含水率 60%。

试验系统由全自动移栽机试验台、一体化取苗夹持力检测传感器、信号采集处理硬件电路、夹持力信号检测软件及便携式计算机组成。

4.2.2 试验方法

根据工业和信息化部发布的旱地栽植机械现行标准(JB/T 10291—2013)及移栽机实际作业状况,通过全自动蔬菜钵苗移栽机试验台控制单个取苗爪以取苗频率 40、50、60 株/min 进行取苗作业,每次试验夹取 128 株穴盘苗,重复 5 次,共计进行 15 组试验。统计在不同取苗频率下夹持力的均值、标准差、极差,分析传感器稳定性,以正常完成取投动作且钵体破损程度在规定范围内的作为取投苗成功的依据,统计每次试验的成功率,研究传感器在作业状态下的适应性,试验结果统计如表 2 所示。

表 2 取苗夹持力试验结果统计

Tab.2 Statistics of seedling clamping force test results

取苗频率/ (株·min ⁻¹)	编号	夹持力 均值/N	标准差/ N	极差/ N	取投苗成 功率/%
40	1	3.42	0.089	0.46	98.8
	2	3.68	0.096	0.43	98.2
	3	3.24	0.092	0.55	99.3
	4	3.28	0.085	0.63	99.2
	5	3.57	0.087	0.57	99.6
50	1	3.75	0.095	0.47	100
	2	3.81	0.106	0.61	98.3
	3	3.26	0.094	0.71	99.6
	4	3.53	0.095	0.68	100
	5	3.79	0.091	0.66	98.7
60	1	3.75	0.097	0.62	98.6
	2	3.89	0.102	0.68	99.3
	3	3.91	0.113	0.72	98.1
	4	4.03	0.124	0.93	97.5
	5	3.98	0.103	0.89	97.8

4.2.3 结果分析

由表 2 可知,不同取苗频率下 15 组试验测得夹持力均值为 3.24~4.03 N,标准差为 0.085~0.124 N,极差为 0.43~0.93 N;取苗频率分别为 40、50、60 株/min 时检测到夹持力均值分别为 3.44、3.63、3.91 N,极差均值分别为 0.53、0.63、0.76 N,取投苗成功率分别为 99.02%、99.32%、98.26%。结果表明,所设计的夹持力传感器在进行夹持力检测时,测

值波动范围小,稳定性好。室内试验表明,所设计夹持力检测传感器在不同取苗频率下具有较好的稳定性、适应性。同时,在试验时也发现了如下问题:

(1)随着取苗频率增加,取苗成功率也随之降低,造成此种现象的原因主要是移栽机高速运转时无法保证机械结构的稳定性。要突破制约移栽技术发展的高速、稳定的瓶颈,不仅要通过检测取苗夹持力提高机器自主感知能力,还要对移栽机的机械机构进行改进优化。

(2)随着取苗频率增加,检测到取苗爪夹持力均值呈现增大趋势,且夹持力数值附近有较多的扰动值,这是由于随着取苗频率的加快,取苗爪对钵体基质的夹持冲击作用增大,同时钵体基质成分分布不均匀,取苗爪在插入钵体过程中突然受阻造成。在后续优化中,可通过软硬件结合的方式,调整滤波范围,降低干扰。

5 结论

(1)以 PDMS 薄膜为电介层材料,设计了一种电容式钵苗夹持力检测传感器,对取苗爪的取苗过程进行受力分析与耦合仿真,得到了传感器最佳嵌入位置,通过封装处理,实现了传感器与取苗爪一体化设计,有效解决了传感器结构与安装方式对取苗爪正常取投动作的干涉,提高了传感器检测精度与使用寿命。

(2)设计了夹持力传感器信号检测系统,通过信号调理电路与信号采集软件,实现了传感器夹持力信号的转换、放大、滤波、显示与保存功能,有效降低了移栽机作业所产生的高频噪声对夹持力信号的影响。

(3)传感器标定试验表明,在不同频率的力冲击下,所设计传感器平均灵敏度为 0.372 8 V/N,平均线性决定系数为 0.989 2,精度为 7.548%,量程为 7 N,完全满足移栽过程中夹持力检测精度要求;室内验证试验表明,在取苗频率 40、50、60 株/min 下,夹持力均值为 3.24~4.03 N,波动范围小,传感器具有良好的稳定性与适应性。

参 考 文 献

[1] 崔永杰,卫咏哲,丁辛亭,等. 基于圆柱凸轮的株距可调式取苗末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(1): 104-114,122.
CUI Yongjie, WEI Yongzhe, DING Xinting, et al. Design and experiment of adjustable spacing end-effector based on cylindrical cam [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 104-114,122. (in Chinese)

[2] 俞高红,王系林,刘建刚,等. 蔬菜钵苗密植移栽机多行取苗机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(1): 94-103.
YU Gaohong, WANG Xilin, LIU Jian'gang, et al. Design and experiment of multi row seedling taking mechanism for dense planting and transplanting of vegetable pot peedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 94-103. (in Chinese)

[3] 马一凡,王卫兵,冯静安,等. 移栽番茄穴盘苗钵体夹持压缩特性试验研究[J]. 中国农机化学报,2020,41(1): 64-71.
MA Yifan, WANG Weibing, FENG Jing'an, et al. Experimental study on compression properties transplanted tomato plug seedlings pot[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(1): 64-71. (in Chinese)

- [4] 韩豹,申大帅,郭畅,等. 可调节式甘蓝钵苗取苗末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(11):111-120.
HAN Bao, SHEN Dashuai, GUO Chang, et al. Design and experiment of adjustable end-effector of cabbage seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 111-120. (in Chinese)
- [5] 计东,胡熙,哲旋瑞,等. 双排移栽机械手联动式高速移栽装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(12):126-133,146.
JI Dong, HU Xi, ZHE Xuanrui, et al. Design and experiment of double row transplanting manipulator linkage high speed transplanting device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 126-133,146. (in Chinese)
- [6] 赵晓琪,杨启志,黄冠龙,等. 小型穴盘苗全自动移栽机取苗机构的设计与试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2022,43(1):54-61.
ZHAO Xiaqi, YANG Qizhi, HUANG Guanlong, et al. Design and test of picking seeding mechanism of small full-automatic transplanter for plug seeding[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2022, 43(1): 54-61. (in Chinese)
- [7] 童俊华,蒋焕煜,蒋卓华,等. 钵苗自动移栽机器人抓取指针夹持苗坨参数优化试验[J]. 农业工程学报,2014,30(16):8-16.
TONG Junhua, JIANG Huanyu, JIANG Zhuohua, et al. Experiment on parameter optimization of gripper needles clamping seedling plug for automatic transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(16): 8-16. (in Chinese)
- [8] 胡建平,张晨迪,王留柱,等. 全自动温室钵苗移栽机设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊):149-154.
HU Jianping, ZHANG Chendi, WANG Liuzhu, et al. Design and experiment of automatic greenhouse seeding transplanting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 149-154. (in Chinese)
- [9] TING K C, GIACOMELLI G A, SHEN S J, et al. Robot Workcell for transplanting of seedlings. Part II. end-effector development[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(3): 1013-1017.
- [10] COTTON D P J, CHAPPELL P H, CRANNY A, et al. A novel thick-film piezoelectric slip sensor for a prosthetic hand[J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(5): 752-761.
- [11] 周俊,朱树平. 农业机器人果蔬抓取中滑觉检测研究[J]. 农业机械学报,2013,44(2):171-176.
ZHOU Jun, ZHU Shuping. Slippage detection in gripping fruits and vegetables for agricultural robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 171-176. (in Chinese)
- [12] 崔玉国,朱耀祥,娄军强,等. 压电微夹钳指位移与夹持力的检测[J]. 光学精密工程,2015,23(5):1372-1379.
CUI Yuguo, ZHU Yaoxiang, LOU Junqiang, et al. Detection of finger displacement and gripping force of piezoelectric micro-gripper[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(5): 1372-1379. (in Chinese)
- [13] JIANG Zhuohua, HU Yang, JIANG Huanyu, et al. Design and force analysis of end-effector for plug seedling transplanter[J]. PLOS ONE, 2017, 12(7): e0180229.
- [14] 王俊,张海洋,金鑫,等. 穴盘苗自动移栽机钵苗夹持力检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(5):79-87.
WANG Jun, ZHANG Haiyang, JIN Xin, et al. Design and experiment of seeding bowl clamping force detection system for plug seeding automatic transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 79-87. (in Chinese)
- [15] 刘双斌,秦会斌. 柔性阵列式压力传感器的制备研究[J]. 传感器与微系统,2021,40(9):34-36,40.
LIU Shuangbin, QIN Huibin. Research on preparation of flexible array pressure sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(9): 34-36,40. (in Chinese)
- [16] LI Pengfei, YUN Zhihao, GAO Kaihang, et al. Design and test of a force feedback seedling pick-up gripper for an automatic transplanter[J]. Agriculture, 2022, 12(11): 1889.
- [17] 陈雷. 微型电容多维力感知机构理论与研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2018.
CHEN Lei. Theory and experimental study of minute capacitance sense mechanism of multiple force[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018. (in Chinese)
- [18] 邹鸿翔,李猛,赵林川,等. 抗冲击车路能量收集减速带设计与自供能交通管控[J]. 机械工程学报,2022,58(20):72-82.
ZOU Hongxiang, LI Meng, ZHAO Linchuan, et al. Design of anti-impact vehicle-road energy harvesting bump and self-powered traffic control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(20): 72-82. (in Chinese)
- [19] 侯丽娟,秦会斌,胡炜薇,等. 基于微纳结构的柔性压力传感器设计与制备[J]. 传感器与微系统,2022,41(7):73-76.
HOU Lijuan, QIN Huibin, HU Weiwei, et al. Flexible pressure sensor design and fabrication based on micro-nano structure[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(7): 73-76. (in Chinese)
- [20] 黄婉宁. 有机半导体材料的设计组装、性能及应用研究[D]. 南京:南京邮电大学,2022.
HUANG Wanning. Design, assembly, properties, and application of organic semiconductor materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunication, 2022. (in Chinese)
- [21] 钟雅琪,张东光,张兴芳,等. 基于微半球结构液态金属弹性体的柔性电容式压力传感器[J]. 仪表技术与传感器,2022(3):23-28,44.
ZHONG Yaqi, ZHANG Dongguang, ZHANG Xingfang, et al. Flexible capacitive pressure sensor based on liquid metal elastomer with micro-hemisphere structure[J]. Instrument Technique and Sensor, 2022(3): 23-28,44. (in Chinese)
- [22] ZHU Yinlong, CHEN Xin, CHU Kaimei, et al. Carbon black/PDMS based flexible capacitive tactile sensor for multi-directional force sensing[J]. Sensors, 2022, 22: 628.
- [23] LIANG Guanbao, WANG Yancheng, MEI Deqin, et al. Flexible capacitive tactile sensor array with truncated pyramids as dielectric layer for three-axis force measurement[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2015, 24(5): 1510-1519.
- [24] 李明勇. 全自动移栽机关键作业质量监测系统的研究[D]. 洛阳:河南科技大学,2019.
LI Mingyong. Research on key operation quality monitoring system of automatic transplanter[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [25] 于英杰,秦伟,赖天辉,等. 花椰菜钵苗移栽机栽植机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):102-112.
YU Yingjie, QIN Wei, LAI Qinghui, et al. Design and experiment of planting mechanism of cauliflower pot seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 102-112. (in Chinese)