

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.041

植物根区电阻抗成像系统设计与实验

李洋^{1,2} 王永千³ 赵鹏飞^{1,4} 王楠^{1,4} 黄岚^{1,4} 王忠义^{1,2}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083; 3. 北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100192; 4. 农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了能及时地监测植物根区的状态,设计了一种32电极的电阻抗成像系统,包括硬件构成和图像重构系统,以数字合成技术(DDS)产生正弦波激励信号,采用相邻激励模式,以乘法器对测量信号和参考信号进行模拟解调,得到被解调信号相对参考信号的实部信息和虚部信息,计算信号的幅值、相位和实部、虚部,基于成像正问题和逆问题算法,以Matlab及开源套件EIDORS予以实现。设计了专用电源,将220V交流电源经整流滤波、线性稳压后为系统提供多种正负电源。实验测量了系统的信噪比、通道一致性等参数,验证了实验平台的可靠性,并在盛有盐水的容器进行了实时电阻抗系统成像实验,对绝缘材料和胡萝卜介质检测,结果表明本系统可有效辨别被测物,并具有很好的分辨率和重复性。

关键词: 植物根区; 电阻抗成像; 图像重构

中图分类号: S24; TP20 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0348-09

Development and Experiment on Electrical Impedance Tomography System for Plant Root Zone

LI Yang^{1,2} WANG Yongqian³ ZHAO Pengfei^{1,4} WANG Nan^{1,4} HUANG Lan^{1,4} WANG Zhongyi^{1,2}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, Beijing 100083, China

3. School of Instrument Science and Opto Electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China

4. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

Abstract: To monitor the state of the plant root zone in real time, a 32-electrode electrical impedance tomography system and image reconstruction method were developed. Direct digital synthesis (DDS) generated sine wave signals, which was converted into an excitation signal by a voltage controlled current source (VCCS). The channel switching circuit injected the excitation signal into the electrode at the edge of the tank to be measured in an adjacent excitation mode. The circuit board and the electrodes were connected with shielded wires to reduce noise. Voltage measurement data were amplified by the instrumentation amplifier and demodulated by an analog multiplier, and then filtered and collected by A/D into the main control unit. Finally, the signal was sent to the host computer through the RS485 bus protocol, and then the data was preprocessed, reconstructed, and analyzed. The system incorporated the following novel features. The current source of the EIT system was a dual op-amp voltage controlled current source composed of a programmable gain instrumentation amplifier and an op-amp. Digital isolator isolated the measurement circuit and the excitation circuit. The measurement circuit channel switch adopted analog multiplexers MAX306. The decoder and the transistor drove the relay to switch the excitation signal channel and control the order of the excitation current injected into the electrode. Direct digital synthesis, channel switching circuit, programmable gain instrumentation amplifier, and other programmable devices were controlled by the main control unit. The multiplier circuit was used to demodulate the measurement signal and the reference signal, and the real part information and imaginary

收稿日期: 2020-08-10 修回日期: 2020-09-16

基金项目: 北京市自然科学基金项目(6192016)

作者简介: 李洋(1994—),男,博士生,主要从事电阻抗成像系统研究,E-mail: Cauliyang@126.com

通信作者: 王忠义(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事生物系统感测与智能装备研究,E-mail: wzyhl@cau.edu.cn

part information of the demodulated signal relative to the reference signal can be obtained to calculate the amplitude, phase, real and imaginary parts of the signal. Matlab and the open-source suite EIDORS were used to realize the reconstructed image based on imaging forward and inverse problem algorithms. In addition, a power supply circuit was designed to provide a variety of positive and negative power supplies for the EIT system after rectifying, filtering, and linearly stabilizing the 220 V AC power supplied. In the experiment, parameters such as system signal-noise ratio (SNR) and channel consistency measured to verify the reliability of the EIT system. Experiment with real-time electrical impedance system imaging in a tank containing saltwater. And the real-time imaging function of the electrical impedance system was tested in a tank filled with saltwater. In the experiment of insulating material and carrot medium, the result showed that this system can effectively distinguish the measured object, and had good resolution and repeatability.

Key words: plant root zone; electrical impedance tomography; image reconstruction

0 引言

植物根区是植物获取营养和水分的重要器官,并具有支持地上部分、贮存合成有机物的作用,是植物赖以生存和作物产量的保障。植物根系控制植物与外界的物质循环和能量循环,在其植株和其生长环境之间起着桥梁作用。同时,植物根系也起着固定土壤,防风固沙的作用。根系的分布特征不仅反映了植物对环境的适应性,也反映了植物对环境的改造能力。因此对植物根系的实时监测对认识和调控农业生产及土壤水肥管理都具有非常重要的意义^[1-2]。科学家提出了很多植物根系监测方法,但都伴有对植物体的破坏且难以实现实时测量。近年来植物根系测量开始向原位无损、实时的方向发展^[3]。医学中已经广泛应用的计算机断层成像技术(Computer tomography)开始应用在植物根系检测中,如 X 射线(X-ray computed tomography, XCT)、核磁共振(Magnetic resonance imaging, MRI)等技术^[4]。但是核素辐射、设备庞大、价格昂贵等缺点使这些技术应用场景受限。所以有必要开发一种无损、廉价的植物根系检测装置。

电阻抗成像(Electrical impedance tomography, EIT)是一种非侵入、无损的检测方式,且能实现实时监测,在临床医学领域研究较多^[5]。土壤和根系含有电解质和水,可以传导电流,土壤中的根被置于某个频率的外部电场中时,土壤、根以及空隙等部分可被等效为电路元器件,电流在其中按照各自的电气特性流通过系统^[6]。根系阻抗特性与其微观结构有关,活体生物组织由细胞及细胞外液构成,而细胞由细胞内液及细胞膜组成,具有导电特性,表现为容性和阻性^[7]。这给电阻抗技术应用在植物根系测量中提供了基础。EIT 主要由激励源、信号采集、图像重构 3 部分构成,本文将设计一种 32 电极的电阻抗成像系统,利用图像重构原位监测植物根系。

1 植物根区电阻抗成像原理概述

植物不同组织器官具有不同电阻抗,实验证明,植物体各组织电阻抗会随着健康状态的变化而变化^[8],因此可以通过检测植物电阻抗的方式获取植物健康状况,EIT 技术不仅能够区分不同的组织结构,还能对组织功能特性成像。

电阻抗成像技术是在待测域周围放置多个电极,其中 1 组或 2 个向待测域施加安全电流或电压,其余电极采集边缘电压值,根据激励信号和测量值建立正问题和逆问题模型^[9],来求解场域内的电导率分布,重构出图像。EIT 可以从远端传感器获得不可直接测量的数据,可以实现非侵入、无损的测量,所以具有很好的安全性^[10]。电阻抗成像技术的关键就在于如何有序向待测域施加激励和收集电压信号,以及如何将采集的信号进行图像重构。EIT 系统通常由数据测量系统和计算机成像系统两部分构成,EIT 数据测量系统包含电流源、电极、电位检测系统、A/D 转换、计算机成像(包含重建和显示)。要得到高品质的图像信息,就要求测量精度高、重复性好、速度快、噪声低,也就要求测量电路具有更高的性能^[11]。

经过十几年的发展,EIT 硬件系统构成基本趋同。但 EIT 多应用于小信号采集的研究中,所以在器件选型、电路设计上要求高,既要保证激励电流在安全范围内、防止噪声的影响,还要保证采集的信号在一定幅值范围内可用^[12-16]。在以往的研究中,激励源常由数字合成(DDS)芯片或通过 FPGA 设计 DDS 电路来产生正弦信号,在激励信号选择中,大多数研究采用恒定电流源将正弦信号注入电极^[17-18],电路设计中,设计各种模拟电路避免噪声的干扰,如:提高放大器输入阻抗,使用内阻较低的元器件等;在图像重构中也出现了绝对成像(静态成像)和时差成像(动态成像)^[19-20] 2 种方法。

2 测量系统设计

系统硬件部分整体构成包含正弦信号发生装置、压控电流源、通道切换电路、电极、信号放大器、模拟解调、滤波、A/D 采集等部分。采用数字合成芯片生成正弦信号,压控电流源将正弦信号转换为激励信号,通过通道选择电路依次注入测量容器,测量电路采用串行设计,测量信号通过前置放大器差分放大后输入乘法器和低通滤波器组成的解调电路,解调信号被 A/D 采集,最后通过 RS485 总线协议将采集电压值发送到上位机。电路中控制信号由单片机接收上位机指令后发出,保证激励和测量流程的时差。本文系统硬件设计结构如图 1 所示。

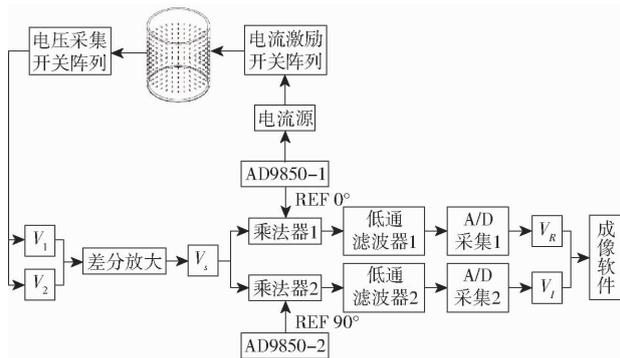


图 1 EIT 系统硬件设计结构

Fig. 1 EIT system structure

2.1 恒流源

恒流源由正弦波发生装置和压控电流源构成,正弦波发生装置采用数字合成芯片 AD9850,压控电流源采用双运放设计。AD9850 内部包含可编程 DDS 频率合成器和高性能 DAC 及高速比较器,可产生频率和相位都可编程的正弦波,芯片控制字可由串行或并行的方式加载,输出频率范围在 0.1 Hz ~ 40 MHz 之间,频率分辨率达到 0.029 Hz, EIT 系统的研究目前在千赫兹 (kHz) 到兆赫兹 (MHz) 范围,可以满足系统要求。

EIT 系统测量数据可用于实部成像和虚部成像,因此本系统中设置了硬件模拟解调,除了需要和激励信号相位相同的参考信号外,还需要与激励信号相位相差 90° 的参考信号,所以要用到 2 个 AD9850。由于 AD9850 可以通过设置控制字改变相位,但在电路中,保证芯片的完全同步还要求 2 个 DDS 芯片的输入时钟源和输出正弦波电子线路相等,但在实际测量时,很难保证两组电路完全对称,所以常采用设置控制字修正的方式,才能保证注入到乘法器的参考信号相位相差 90°。AD9850 输出信号为两路正弦电流,要通过接地电阻转为电压信号,再通过仪表放大器 (AD8251) 放大得到均值为 0

的正弦波。此时的正弦信号才能作为参考信号和电流源的输入信号。

电流源是 EIT 系统中的重要组成部分,是 EIT 作为主动测量方式的标志,电流源的输出频率范围、幅度范围、输出阻抗、稳定性影响整个系统的测量结果。本文设计的电流源由双运放构成,其中 AD8251 为程控仪表放大器,可以通过单片机发送控制字改变电流源输出幅值,结合 AD9850 可以控制正弦波频率,本文设计 EIT 系统电流源可以实现幅值、频率的自由设置,以研究植物根系在不同激励条件下的阻抗分布情况。

2.2 多通道控制电路

2.2.1 测量端

本系统采用 32 电极设计,激励电极和测量电极分时复用。为了尽可能减少接触阻抗的影响,采用四端法测量边界电压。系统测量电路采用串行设计,对采集速度要求较高,测量端采用模拟多路复用器 MAX306,开关速度小于 250 ns,单端 16 选 1,所以可以采用每 2 个 MAX306 构成 1 个测量单元,2 个 MAX306 同时打开连接到 2 个测量电极,即可完成一次测量。在测量端,由于模拟开关后端为仪表放大器,仪表放大器的输入阻抗在吉欧姆 (GΩ) 水平,而 MAX306 的导通电阻只有 100 Ω 左右,可以忽略不计,所以采用 MAX306 在测量端控制通道切换。

2.2.2 激励端

在激励端,模拟多路复用器的内阻不能被忽略,器件内阻分压会改变电流源的输出,且使器件发热,导致性能下降,给系统带来不确定性,所以这里采用译码器和三极管驱动继电器的方式。译码器接收单片机发送的控制信号,信号经过译码后作为三极管基极的控制信号,三极管集电极驱动继电器,低电平导通,高电平截止,从而控制继电器的闭合和断开,完成激励通道的切换。三极管选用 PNP 型,磁簧继电器的最大导通电阻仅为 150 mΩ,图 2 为开关电路设计。

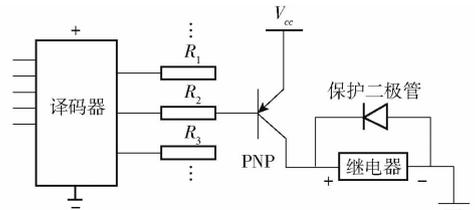


图 2 激励信号切换电路

Fig. 2 Excitation signal switching circuit

2.3 解调模块

解调是从携带信息的载波信号中恢复信息的过程。激励源发出的正弦波相当于载波信号,施加到待测区后,电流在基质、根系中传导,使正弦波的幅

值、相位发生改变。测量信号中包含了待测区中的信息,需要通过解调获得用于 EIT 成像的幅值、相位。

信号采集后通过 AD8421 进行差分放大,放大后的信号分为 2 路,分别与 2 个相位相差 90°的参考信号 $V_{ref}(t)$ (初相位 0°) 和参考信号 $V_{ref90}(t)$ (初相位 90°) 相乘。定义被解调信号为

$$V_s(t) = A_s \sin(\omega t + \phi) \quad (1)$$

$$V_{ref}(t) = A_{ref} \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$V_{ref90}(t) = A_{ref90} \cos(\omega t) \quad (3)$$

式中 t ——时间 ω ——角频率

ϕ ——被解调信号相对于参考信号的相角

A_s ——被解调信号幅值

A_{ref} ——0°参考信号幅值

A_{ref90} ——90°正交参考信号幅值

采用硬件模拟乘法器解调。乘法器采用 AD835,该乘法器可以进行四象限乘法并电压输出,公式为

$$W = XY + Z$$

式中 X, Y ——差分输入

Z ——常数 W ——输出电压

输入电压最大范围是 -1 ~ 1 V。图 3 为乘法器内部原理图,图中被乘数和乘数的输入为 X_1, X_2 的差分信号和 Y_1, Y_2 的差分信号, X_2, Y_2 常接 GND。

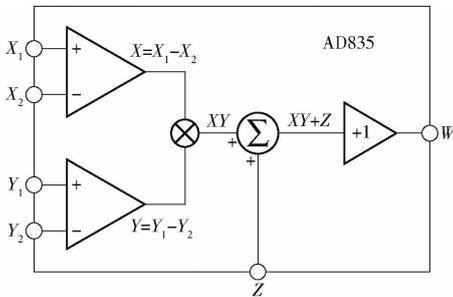


图 3 乘法器内部原理图

Fig. 3 Multiplier internal schematic

式(1)分别与式(2)、(3)相乘后结果为

$$V_1(t) = -\frac{A_s A_{ref}}{2} (\cos(2\omega t + \phi) - \cos\phi) \quad (4)$$

$$V_2(t) = -\frac{A_s A_{ref90}}{2} (\sin(2\omega t + \phi) - \sin\phi) \quad (5)$$

将 $V_1(t)$ 和 $V_2(t)$ 通过二阶巴特沃斯低通滤波器,滤除参考信号频率的 2 倍频交流分量,图 4 为低通滤波器电路图。

低通滤波器滤除交流分量后,便可得到被解调信号相对于参考信号的实部信息 V_R 和虚部信息 V_I

$$V_R = \frac{A_s A_{ref}}{2} \cos\phi \quad (6)$$

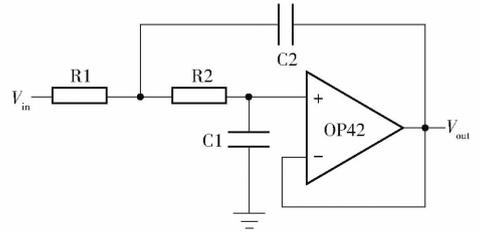


图 4 低通滤波电路设计图

Fig. 4 Low pass filter circuit design

$$V_I = \frac{A_s A_{ref90}}{2} \sin\phi \quad (7)$$

在经过低通滤波器后, V_R 和 V_I 为一定幅值的模拟电压信号,由式(6)、(7)可知,这时电压信号为直流信号,通过 A/D 采集发送到上位机进行下一步解算,在设 A_s, A_{ref} 已知的前提下,对式(6)、(7)进行三角函数变换可得

$$\phi = \arctan \frac{V_I A_{ref}}{V_R A_{ref90}} \quad (8)$$

$$A_s = 2 \sqrt{\left(\frac{V_I}{A_{ref90}}\right)^2 + \left(\frac{V_R}{A_{ref}}\right)^2} \quad (9)$$

最后,将求得的幅值和相位通过图 5 四象限计算即可求得矢量电压的实部和虚部。

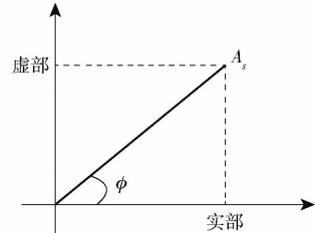


图 5 四象限计算

Fig. 5 Quadrant calculation

2.4 微控制器和上位机程序设计

2.4.1 微控制器程序设计

系统微控制器主要任务是控制继电器选通通道,将激励信号注入电极,以及控制测量端的模拟开关按测量次序依次打开,采集电极上的信号;其次还要负责 A/D 采集和向上位机发送采集数据。本设计为电阻抗实时成像系统,需要 2 路 A/D 采集同时对实部和虚部进行采集, A/D 数据为 8 次测量均值。由以上分析, EIT 系统对单片机性能和处理速度要求不高, 本文选用 C8051 系列单片机作为主控芯片,设计最小系统。最小系统和激励电路以及通信电路之间采用隔离芯片隔离,以减少互相之间的影响。在单片机中设计控制逻辑,接收上位机指令,完成控制通道切换、A/D 采集以及读取发送通信指令的任务。图 6 为单片机程序流程图。

2.4.2 上位机程序设计

上位机程序设计分为 2 部分,激励与测量策略

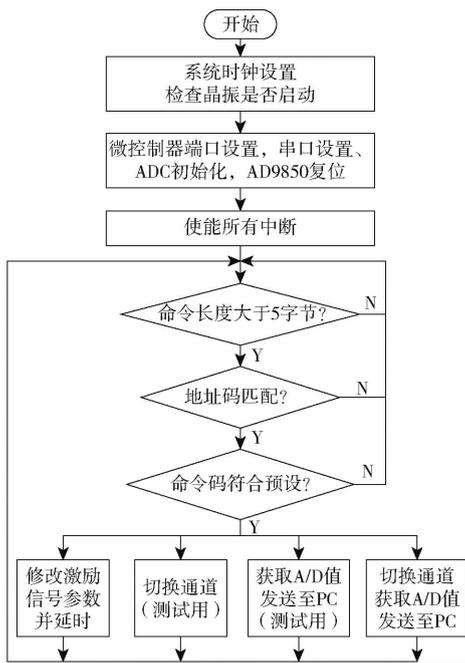


图6 微控制器程序流程图

Fig. 6 Microcontroller program flow chart

设计和图像重构。激励模式和测量模式是影响图像重建品质的重要因素。通常激励驱动方式有: 相邻激励、交叉激励和相对激励, 测量模式主要采用相邻测量。按照电流注入和流出电极在被测场域表面的间隔称为驱动角, 用 γ 表示, 驱动角可以用角度、弧度和电极个数来描述, 这种方式可以将各种驱动模式统一起来, 按照电流注入电极和流出电极驱动角来描述驱动模式对测量的影响。

不同激励模式下电流在容器中形成的回路不同, 电流密度也有明显差异, 在 COMSOL 中对 3 种驱动模式进行了正问题仿真, 得到不同激励模式下电流密度曲线和等势线, 为电极阵列设计和驱动模式选择提供参考。由图 7 可知, 在驱动角 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内, 驱动角越大, 电流密度和等势线在容器中分布越均匀, 表示模型越敏感, 探测深度越深, 在系统搭建过程中, 上位机设计了驱动模式切换控制方法, 可根据实验需要设置激励模式和测量模式。

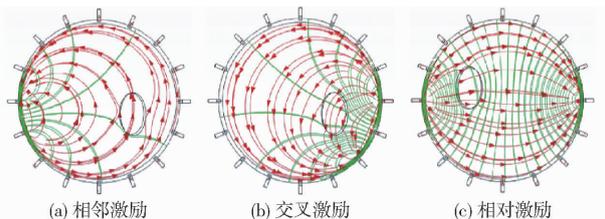


图7 驱动模式

Fig. 7 Excitation drive mode

图像重构分为正问题和逆问题求解。正问题是在已知激励电流和待测域电导率分布的情况下, 计算边界电压, 以便与真实的测量值作比较; 逆问题是指已知激励信号和边界测量的真实电压值计算被测

域电导率分布。根据正问题计算的电压值和真实测量值来求解和修正被测区域的电导率分布, 通过不断迭代求解, 直到方程收敛, 满足边界条件^[10,21]。本文图像重构部分采用开源套件 EIDORS (Electrical impedance tomography and diffuse optical tomography reconstruction software)^[22-24], 正问题求解采用有限元方法, 逆问题求解采用基于正则化图像重建算法。

上位机程序设计包括串口连接, 激励信号频率、幅值、2 路参考信号相角设置, 激励模式选择等功能, 并对实验过程实时显示。上位机通过串口与微控制器连接, 首先将用户设置(激励模式、频率设置等指令)发送到单片机, 然后根据选项生成激励和测量策略, 向译码器和模拟开关发送指令, 接收 A/D 采集数据。采集后的数据保存到计算机上, 并通过正则化有限元模型重构图像, 在 Matlab 中编写 GUI 图形界面。

3 系统评估

3.1 恒流源测试

恒流源稳定性直接影响测量结果的准确性, 恒流源的稳定性包含频率范围、电流源稳定性和频率切换速度。一般的 EIT 系统激励频率在千赫兹到兆赫兹范围内, 将频率控制字设置在 2 MHz, 用示波器测量恒流源输出, 结果如图 8 所示。恒流源的频率范围满足 EIT 系统要求, 连续测量 2 路参考信号 4 个周期, 结果表明参考信号依然满足相位相差 90° 。

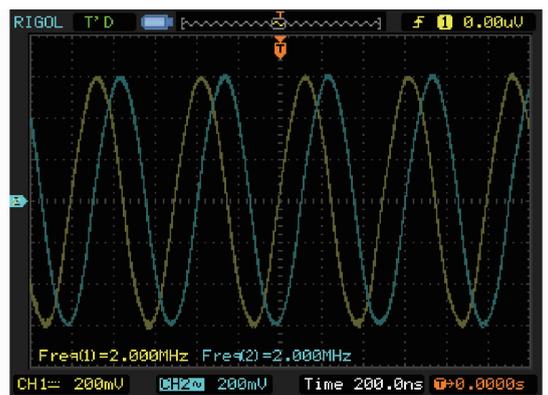
图8 激励信号和相差 90° 参考信号测量结果

Fig. 8 System sine signal at two frequencies

频率切换速度主要由要求频率合成芯片在接收到控制字后输出信号的稳定时间和电流源运放的响应时间决定。本设计采用双运放电流源, 双运放的稳定时间在微秒范围内, 变化率小于 0.01%。AD9850 的测量结果如图 9 所示, 从接收到切换命令到采集信号稳定, 当变化率小于 0.05% 时, 需要

500 ms, 所以设计中频率切换速度主要受频率合成芯片的制约, 在测量中需要特殊注意延时。

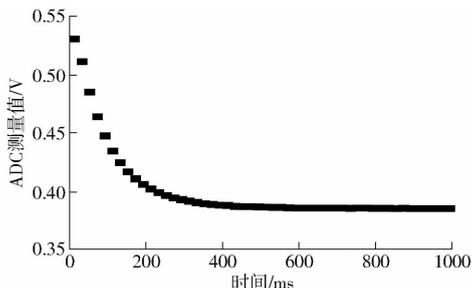


图9 激励和参考信号变化稳定时间测试结果

Fig. 9 Excitation and reference signal test

3.2 通道一致性和信噪比 (SNR)

通道一致性, 即 U 型曲线^[25-26], 可以直观反映通道切换电路的硬件设计效果和控制逻辑的正确性, 是验证设计正确性的最直接方法, 除了通道切换电路, 与通道一致性相关的硬件包括电极阵列、屏蔽线缆。U 型曲线应该根据激励模式和测量模式的不同, 展现出相应的对称性; 其次, 可以通过数值计算量化通道一致性, 来描述通道的稳定性^[27], 将实验数据串联获得 U 型曲线。图 10 为 120 kHz, 激励电流 8 mA 峰-峰值 (p-p) 下的 U 型曲线, 测量过程中容器中盛有纯盐水, 没有被测物。由于系统为 32 电极, 采用相邻激励、相邻测量方式, 激励电极不测量, 所以共 32 × 29 组数据。由图 10 可知, 每组数据规律一致, 且实部数据与虚部数据趋势一致, 说明系统激励切换通道和测量切换通道性能稳定。

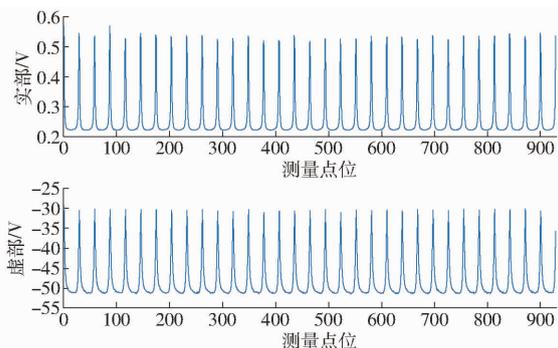


图 10 U 型曲线

Fig. 10 U-shaped curves

除 U 型曲线外, 还可通过公式量化通道一致性, 计算公式为

$$C_c = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^L (V_i^2 - \bar{V}^2) / L}}{\bar{V}} \quad (10)$$

式中 C_c ——通道一致性

\bar{V} ——平均电压

V_i ——第 i 次测量电压

L ——测量次数

信噪比 (R_{SNR})^[28] 也是系统整体性能的重要指标, 计算式为

$$R_{SNR} = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^L V_i^2}{\sum_{i=1}^L (V_i - \bar{V})^2} \quad (11)$$

通过计算可得通道的信噪比和通道一致性均值分别为 53.32 dB 和 0.0114。系统性能还包括空间分辨率、形变量、位置误差等指标^[29], 需要将重构图像结果与被测物位置比较。

4 实验与结果分析

成像方法分为绝对成像和时差成像, 绝对成像通过容器外围电极测量电压信号和激励电流, 计算目标内部电阻抗绝对值。动态成像是通过对 2 个不同时刻下测量的电压信号求差值, 计算目标内部的电阻抗变化。在时差成像过程中, 通常以纯盐水或混合基质作为对比。时差成像较绝对成像测量时间长, 但绝对成像对于 EIT 系统硬件要求更高, 要求各通道阻抗绝对一致, 而差分成像可以通过求差减掉系统固有噪声。本文采用 EIDORS 提供的软件算法开发套件, 对 EIT 系统采集的电压信号进行时差成像。

实验在半径 14 cm 的有机玻璃桶中进行, 如图 11a 所示, 待测物位置见图 11b。选用不锈钢螺栓作为实验电极, 电极长 23 mm, 半径 1.3 mm, 属于点电极。电极通过屏蔽线与电路板连接, 屏蔽层集总后接地。实验中的基质使用去离子水和 NaCl 调制, 绝缘瓶为直径 6 cm 的圆柱, 电流峰峰值设置为 8 mA (p-p)。首先进行纯盐水实验作为差分成像基础, 再进行绝缘待测物实验。实验变量为激励频率对测量结果的影响。

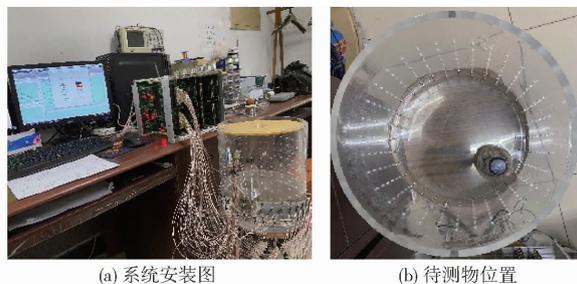


图 11 EIT 系统实验

Fig. 11 EIT system test

4.1 绝缘待测物

采用相邻激励对 4 种频率下的绝缘材料进行时差成像, 频率依次设置为 50、80、100、120 kHz, 如图 12 所示, 左图为实部成像结果, 右图为虚部成像结果。

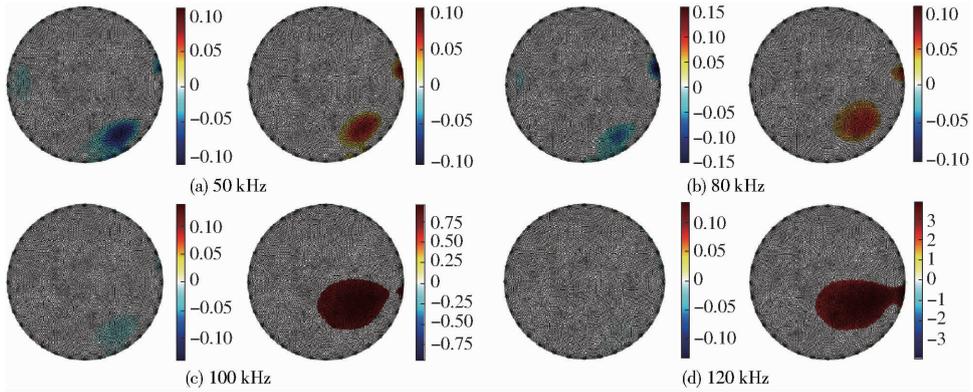


图 12 绝缘待测物重构结果

Fig. 12 Insulator reconstructed results

图 12 为二值化分析后重构结果,相比热力图更加凸显被测物。由图可知,4 种频率激励下,绝缘待测物边缘均有显现,但 50、80 kHz 实部、虚部对绝缘材料位置反应明显;而在 100、120 kHz 激励情况下,实部造影较小,只能在虚部看到一定影像,所以激励频率对成像质量有很大影响。通过实验找到不同待测物适宜的激励频率对 EIT 系统的应用范围有重要意义。

通过评价函数对实部成像结果进行评价,评价参数包括图像整体振幅(AR)、位置误差(PE)、分辨率(RES)、形变量(SD)、阴影振幅(RNG),评价结果见表 1。50、80 kHz 激励情况下待测物影像形变和位置偏移很小。绝缘材料直径为 6 cm,而成像结果中被测物直径都有不同程度放大或缩小,但待测物中心颜色更深;RNG 参数也说明 50、80 kHz 激励下对比更为明显,但成像结果并不能直接表明待测物具体直径数值,需要算法进一步改进。

表 1 成像结果评价参数

Tab. 1 Evaluation parameters of reconstruction results

评价参数	激励频率/kHz			
	50	80	100	120
AR	224.21	175.73	-474.29	-812.06
PE	82.980	76.151	25.526	175.510
RES	0.62770	0.52857	0.32598	0.31489
SD	0.15490	0.20578	0.41945	0.26710
RNG	0.12430	0.17483	36.59900	5.02300

4.2 植物根区待测物实验验证

以新鲜胡萝卜作为植物根区待测物进行成像实

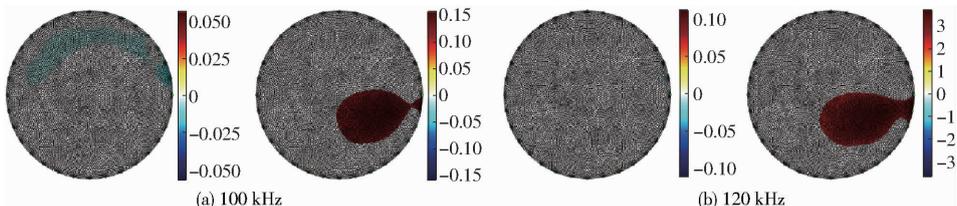


图 14 植物根区重构结果

Fig. 14 Plant root zone reconstructed results

验,实验设置如图 13 所示,与绝缘待测物实验相同,待测物置于右下。



图 13 植物根区实验

Fig. 13 Plant root zonetest

经过多次实验,50、80 kHz 情况下成像成功率较低,且实部、虚部都没有造影出现。图 14 为 100、120 kHz 成像结果,由图可知,2 种频率下实部成像均没有结果,新鲜胡萝卜含水率较高,电阻率与器皿中基质相似,而虚部反映待测物的容性信息,可在虚部反映待测物位置、尺寸等信息,实验间接表明了电阻率成像(ERT)的缺点,并证明了电阻抗成像技术的研究意义。

对实验平均时间进行了记录,每次测量需要大约 5 min,影响测量时间的主要因素是电极个数,但串行测量的方式也是影响测量效率的重要因素。虽然模拟多路复用器可以实现快速通道切换,但采集速度依然受到电路中其他器件的响应时间影响,可以通过硬件改造来提升实验效率,即在 A/D 采集之

前,信号的放大、解调都采用并行或半并行的方式。

5 结论

(1)设计了一种用于植物根区原位测量 EIT 成像系统,介绍了系统硬件设计方案和重构方法。主要包括系统的电流源设计、通道控制电路、解调方法、软件算法控制逻辑以及驱动模式,对系统主要性能进行了测试,并进行了成像实验。

(2)在 COMSOL 中对正问题进行了仿真,获得电流在待测容器中的路径和引起待测域电势差变化

情况,为系统硬件设计和实验设置提供依据。

(3)对系统主要性能进行了评估,恒流源输出波形、频率范围、切换速度和稳定性均能满足系统设计的要求,两路参考信号相位差稳定。以通道一致性和 SNR 作为对系统电路的整体评价的指标,结果显示通道 U 型曲线稳定,信噪比均值为 53.32 dB。

(4)对 EIT 系统采集数据进行了成像,通过绝缘材料和胡萝卜测试,实验结果表明,频率和基质成分是影响成像结果的重要因素。系统总体能够完成测量和成像的功能,但成像速度、成像品质还有待提高。

参 考 文 献

- [1] STEFANO M. Measuring roots[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [2] 王永千,赵鹏飞,范利锋,等. 基质根区阻抗谱测量中补偿和耦合方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(6):288-298.
WANG Yongqian, ZHAO Pengfei, FAN Lifeng, et al. Compensation and coupling methods in impedance spectroscopy measurement for substrate root zone[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 288-298. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190633&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.033. (in Chinese)
- [3] ZHAO Pengfei, ZHANG Hanlin, ZHAO Dongjie, et al. Rapid on-line non-destructive detection of the moisture content of corn ear by bioelectrical impedance spectroscopy[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2015, 8(6): 37-45.
- [4] WANG Yongqian, FAN Lifeng, HUANG Lan, et al. Remote crop water requirement monitoring system based on multi-sensor[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2017, 26(3):399-409.
- [5] 王仁平. 三维电阻抗成像系统设计与实现[D]. 天津:河北工业大学, 2006.
WANG Renping. Design and implementation of three dimensional electrical impedance tomography system[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [6] HANUMANTHA RAO B, AJAZ M Bhat, SINGH D N. Application of impedance spectroscopy for modeling flow of AC in soils[J]. Geomechanics and Geoengineering: An International Journal, 2007, 2(3):197-206.
- [7] SAPUAN I, YASIN M, AIN K, et al. Anomaly detection using electric impedance tomography based on real and imaginary images[J]. Sensors, 2020, 20(7):1907-1925.
- [8] ANDO Y, MIZUTANI K, WAKATSUKI N. Electrical impedance analysis of potato tissues during drying[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 121:24-31.
- [9] BERA T K, JAMPANA N. A multifrequency constant current source suitable for electrical impedance tomography (EIT)[C]// International Conference on Systems in Medicine & Biology. IEEE, 2011.
- [10] 徐桂芝. 生物医学电阻抗成像技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [11] 曲志刚. 生物电阻抗成像数字化系统设计[D]. 天津:天津大学, 2005.
QU Zhigang. Design of digital system for bioelectrical impedance tomography[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese)
- [12] 何为, 罗辞勇, 徐征. 电阻抗成像原理[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- [13] 戎立锋. 电阻抗成像技术的研究与系统设计[D]. 南京:南京理工大学, 2006.
RONG Lifeng. Research and system design of electrical impedance tomography[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
- [14] YASUMASA A, KOICHI M, NAOTO W. Electrical impedance analysis of potato tissues during drying[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 121:24-31.
- [15] 冉鹏, 何为, 徐征, 等. 交叉平面电阻抗成像模型分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2013, 36(11):8-14.
RAN Peng, HE Wei, XU Zheng, et al. Analysis of cross-plane electrode arrays for electrical impedance tomography[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2013, 36(11):8-14. (in Chinese)
- [16] 涂戈. 电阻抗成像系统设计[D]. 成都:电子科技大学, 2015.
TU Ge. The design of electrical impedance imaging system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [17] 冉鹏, 何为, 徐征, 等. 基于数字处理的频差电阻抗成像系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2):448-454.
RAN Peng, HE Wei, XU Zheng, et al. Design of frequency difference electrical impedance imaging system based on digital processing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(2):448-454. (in Chinese)

- [18] HAN B, XU Y, DONG F. Design of current source for multi-frequency simultaneous electrical impedance tomography[J]. Review of entific Instruments, 2017, 88(9):094709.
- [19] JAMES A, THOMAS D, MAYO F, et al. A versatile and reproducible multi-frequency electrical impedance tomography system [J]. Sensors, 2017, 17(2):280 – 300.
- [20] SUSANA A S, ANNE R, ANNA B, et al. System description and first application of an FPGA-based simultaneous multi-frequency electrical impedance tomography[J]. Sensors, 2016, 16(8):1158 – 1179.
- [21] 张夏婉. 多频电阻抗成像算法研究[D]. 南京:南京邮电大学,2018.
ZHANG Xiawan. Study on multi-frequency image reconstruction algorithms for electrical impedance tomography[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018. (in Chinese)
- [22] POLYDORIDES N, LIONHEART W R B. A Matlab toolkit for three-dimensional electrical impedance tomography: a contribution to the electrical impedance and diffuse optical reconstruction software project [J]. Measurement Science & Technology, 2002, 13(12):1871 – 1883.
- [23] ANDY A, LIONHEART W R B. Uses and abuses of EIDORS: an extensible software base for EIT [J]. Physiological Measurement, 2006, 27(5): S25.
- [24] ANDY A, LIONHEART W R B. EIDORS: towards a community-based extensible software base for EIT [C]//6th Conference on Biomedical Applications of Electrical Impedance Tomography, London, UK,2005.
- [25] 孙晓彤. 乳腺三维电阻抗成像硬件系统的初步设计[D]. 北京:北京协和医学院,2013.
SUN Xiaotong. The preliminary design of the three-dimensional electrical impedance imaging hardware system for breast[D]. Beijing: Chinese Academy of Medical Sciences, 2013. (in Chinese)
- [26] HONG S, LEE J, BAE J, et al. A 10.4 mW electrical impedance tomography SoC for portable real-time lung ventilation monitoring system[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2015, 50(11): 2501 – 2512.
- [27] 李宏英. 三维电阻抗成像系统设计[D]. 天津:天津科技大学,2014.
LI Hongying. Design of three dimensional electrical impedance tomography system[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [28] YANG Yunjie. An advanced digital electrical impedance tomography system for biomedical imaging [D]. Edinburgh: The University of Edinburgh, 2017.
- [29] SILVERA-TAWIL D, RYE D, SOLEIMANI M, et al. Electrical impedance tomography for artificial sensitive robotic skin: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(4):2001 – 2016.

(上接第 347 页)

- [17] 乔虹,冯全,赵兵,等. 基于 Mask R - CNN 的葡萄叶片实例分割[J]. 林业机械与木工设备,2019,47(10):15 – 22.
QIAO Hong, FENG Quan, ZHAO Bing, et al. Instance segmentation of grape leaf based on Mask R - CNN [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2019,47(10):15 – 22. (in Chinese)
- [18] 蒋良卫,黄玉柱,邓芙蓉. 基于深度学习技术的图片文字提取技术的研究[J]. 信息系统工程,2020(3):87 – 88.
JIANG Liangwei, HUANG Yuzhu, DENG Furong. Research on image and text extraction technology based on deep learning technology [J]. China CIO News, 2020(3):87 – 88. (in Chinese)
- [19] 熊俊涛,戴森鑫,区炯洪,等. 基于深度学习的大豆生长期叶片缺素症状检测方法[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(1):195 – 202.
XIONG Juntao, DAI Senxing, OU Jionghong, et al. Leaf deficiency symptoms detection method of soybean based on deep learning [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1):195 – 202. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200121&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.021. (in Chinese)
- [20] 陈士旺,李莉,杨成飞,等. 基于基质含水率的作物蒸腾量估算与预测模型研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(增刊):187 – 194.
CHEN Shiwang, LI Li, YANG Chengfei, et al. Estimation and prediction model of crop transpiration based on matrix moisture content [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.):187 – 194. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s029&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.029. (in Chinese)
- [21] 穆龙涛,高宗斌,崔永杰,等. 基于改进 AlexNet 的广域复杂环境下遮挡猕猴桃目标识别[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(10):24 – 34.
MU Longtao, GAO Zongbin, CUI Yongjie. et al. Kiwifruit detection of far-view and occluded fruit based on improved AlexNet [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10):24 – 34. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191003&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.003. (in Chinese)