

基于磁感应断层成像的根茎类植物电导率测量研究

孙岳 陈泊含 吴燕琪^(通讯作者) 施岩 吕若凡

中国计量大学计量测试与仪器学院,浙江杭州,310018;

摘要:根茎类植物是重要作物,其内部电导率蕴含生理与生长信息。针对传统无损检测方法的局限,本研究开发了基于磁电传感器的磁感应断层成像(MIT)系统,结合MNR迭代正则化算法,实现电导率精确测量与成像。结果表明:萝卜样本厚度增加时,感应磁场强度线性增强且磁场二维分布呈现由中心向外扩散形态;电导率二维成像结果验证了算法有效性。该测量方法为根茎类植物生长监测和精准农业管理提供了新手段,有望推动农业智能化。

关键词:根茎类植物;电导率;电磁感应;磁感应断层成像

DOI: 10.69979/3041-0673.26.01.098

引言

根茎类植物(如马铃薯、甘薯、萝卜、莲藕等)是人类饮食中碳水化合物、维生素和矿物质的重要来源,也是农业生产中的经济作物^{[1][2]}。植物细胞的细胞膜是维持细胞内外物质交换和渗透压平衡的关键结构。当植物受到逆境(如低温、干旱、病虫害、机械损伤)或衰老影响时,细胞膜通透性会增加,导致细胞内的电解质(如钾离子、钠离子、有机酸等)外渗,使周围溶液的电导率升高^{[3][4]}。因此,电导率可作为反映细胞膜完整性和植物生理状态的生理指标,根茎类植物电导率测量的核心意义在于:通过简单的物理指标(电导率)快速、灵敏地反映植物的细胞膜完整性,进而关联到其生理状态、抗逆性、新鲜度和品质^[5]。

为了测量植物的电导率,2013年熊宁等人通过浸泡法,再使用仪器测得稻谷浸出液的电导率^[6]。2009年王琢等人运用将电流—电压四端法设计了可直接测量植物电导率的系统,有助于电导率的直接测量。2002年兰敬辉通过对电解质溶液导电机理的研究,为了弥补传统方法的不足,提出选频电导率测量方法。当前方法测量获得电导率误差较大,且操作极为复杂,需要应用一种更简单的测量方法。

本实验采用磁感应涡流技术进行测量,并磁感应断层成像重建植物二维电导率分布图像。其中,磁感应涡流可进行高频、高灵敏度的单点或小范围监测,捕捉电导率的瞬时变化;磁感应断层成像技术的全局成像,两者相结合是空间与动态的协同,既解决了单一技术在时空分布上的局限,又通过互补机制提升了抗干扰性与适用性。

1 测量原理与成像方法

1.1 磁感应涡流产生原理

磁感应涡流场本质是变化的交流磁场在导体中感应出涡流,同时涡流又会激发新的磁场,形成相互作用的场分布。当激励线圈中通入交流电流时,其产生的交变磁场会在空间中感应出涡旋电场。该电场的方向垂直于磁场变化率方向,呈环形环绕磁力线分布,其强度与磁场变化率成正比。若将良导体置于此涡旋电场中,电场会驱动导体内部的自由电荷定向移动,形成闭合的环形电流,即涡流(场)。根据楞次定律,此涡流产生的磁场将阻碍原激励磁场的变化,最终达到动态平衡。

图1为植物切块中涡流产生原理图,当线圈中通以正弦交变电流I时,会在植物内部产生一系列自成闭合回路的旋涡状感应电流,这些电流就被称为涡流,由涡流产生的磁场即为涡流场。

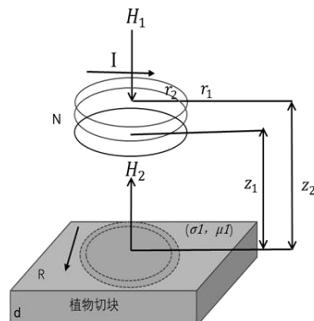


图1 植物切块中涡流产生原理

Fig. 1 Eddy current generation principle in plant cutting

以植物切块上表面正中心为坐标原点,植物切块厚度为d,半径为R,电导率 σ_1 ,磁导率 μ_1 。空气的电导

率 σ_2 , 磁导率 μ_2 。激励线圈放置于植物切块的正上方, 激励线圈的总匝数为 N , 内径和外径分别为 r_1 、 r_2 , 激励线圈底部高度为 z_1 , 顶部高度为 z_2 。激励线圈施加角频率为 ω 的交流激励电流 I 时, 激励线圈中的电流密度:

$$i_0 = \frac{NI}{[(r_2 - r_1)(z_2 - z_1)]} \quad (1)$$

激励电流 I 产生激励磁场 $B_z^{(s)}$ 时, 植物切块会感应出电涡流, 进而产生感应磁场 ΔB 。根据涡流场及感应磁场理论, 可以得到导体上方区域内任意一点处磁场大小为:

$$B_z = B_z^{(s)} + \Delta B_z \quad (2)$$

$$\begin{aligned} B_z^{(s)} &= \mu_0 i_0 (\omega) \sum_{i=1}^{\infty} J_0(a_i r) \frac{\chi(a_i r_1, a_i r_2)}{a_i^3} \cdot \\ &F(a_i z_1, a_i z_2, a_i z) \frac{1}{[R J_0(a_i h)]^2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta B_z &= \mu_0 i_0 (\omega) \sum_{i=1}^{\infty} J_0(a_i r) e^{-a_i z} \frac{\chi(a_i r_1, a_i r_2)}{a_i^3} \cdot \\ &(e^{-a_i z_1} - e^{-a_i z_2}) \frac{1}{[R J_0(a_i h)]^2} \frac{V_1}{U_1} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 B_z 为导体上方区域的磁场在 z 方向的分量, $\Delta B_z^{(s)}$ 与 ΔB_z 分别为激励磁场与感应磁场 z 方向的分量, 其中 $F(a_i z_1, a_i z_2, a_i z)$ 与 $\chi(x_1, x_2)$ 可以由下式计算:

$$F(a_i z_1, a_i z_2, a_i z) = \begin{cases} e^{a_i(z_2-z)} - e^{a_i(z_1-z)}, & z \geq z_2 \\ 2 - e^{a_i(z-z_2)} - e^{a_i(z_1-z)}, & z_2 \geq z \geq z_1 \\ e^{a_i(z-z_1)} - e^{a_i(z-z_2)}, & z_1 \geq z \end{cases} \quad (5)$$

$$\chi(x_1, x_2) = \int_{x_1}^{x_2} x J_1(x) dx \quad (6)$$

V_1/U_1 代表反射系数, 对于 n 层导电材料, 该系数可由下面的递归函数求解:

$$\begin{aligned} U_k &= \left(\frac{\alpha_{k-1}}{\mu_{k-1}} - \frac{\alpha_k}{\mu_k} \right) e^{-2\alpha_k(d_k-d_{k-1})} V_{k+1} \\ &+ \left(\frac{\alpha_{k-1}}{\mu_{k-1}} + \frac{\alpha_k}{\mu_k} \right) U_{k+1} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} V_k &= \left(\frac{\alpha_{k-1}}{\mu_{k-1}} + \frac{\alpha_k}{\mu_k} \right) e^{-2\alpha_k(d_k-d_{k-1})} V_{k+1} \\ &+ \left(\frac{\alpha_{k-1}}{\mu_{k-1}} - \frac{\alpha_k}{\mu_k} \right) U_{k+1} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{其中, } U_n = \frac{\alpha_{n-1}}{\mu_{n-1}} + \frac{\alpha_n}{\mu_n}, \quad V_n = \frac{\alpha_{n-1}}{\mu_{n-1}} - \frac{\alpha_n}{\mu_n},$$

$$\alpha_n = \sqrt{a_n^2 + j\omega\mu_L\sigma_L}, \quad \alpha_{k-1}|_{k=1} = a_i.$$

通过以上等式, 可以计算出导体上方任意点处磁场幅值的解析解。

1.2 MNR 迭代正则化成像算法

磁感应断层成像是一种基于电磁感应原理的非侵入式成像技术。当被测导体处于激励线圈生成的时变激励磁场中时, 导体内部因电磁感应效应产生涡流, 进而激发感应磁场 (ΔB)。该感应磁场的幅值、相位等参数直接受导体内部电导率分布与几何结构的影响。通过解析合成磁场的扰动信号 (如幅值变化、相位偏移), 可反演重建被测物体的电导率分布及结构特征。

改进牛顿-拉夫逊 (Modified Newton-Raphson, MNR) 迭代正则化算法是解决病态逆问题的重要方法, 特别适用于非线性模型或大规模数据场景。

MNR 迭代正则化算法的目标函数定义为:

$$J(\sigma) = \frac{1}{2} \| S(\sigma) - V \|^2 \quad (9)$$

将 $J(\sigma)$ 对 σ 进行求导, 令导数为 0, 可得:

$$J'(\sigma) = [S'(\sigma)]^T (S(\sigma) - V) = 0 \quad (10)$$

其中 $[S'(\sigma)]_{ij} = \frac{\partial S(\sigma)_i}{\partial \sigma_j}$ 为 $m \times n$ 阶的雅可比矩阵,

将目标区域一点 σ^k 处进行泰勒级数展开, 保留线性部分:

$$J'(\sigma) = J'(\sigma^k) + J''(\sigma^k)(\sigma^{k+1} - \sigma^k) \quad (11)$$

其中 $J''(\sigma^k)$ 为海森矩阵, 其定义为:

$$J''(\sigma^k) = \left[S'(\sigma^k) \right]^T S'(\sigma^k) + \left[S''(\sigma^k) \right]^T [I_n \otimes [S(\sigma) - V]] \quad (12)$$

其中 \otimes 为克罗内克积 (Kronecker product)，由于对于海森矩阵的计算的准确性很难保证，同时海森矩阵中第一项 $[S'(\sigma^k)]^T S'(\sigma^k)$ 往往远大于第二项 $[S''(\sigma^k)]^T [I_n \otimes]$ ，因此式(13)可以写作：

$$J''(\sigma^k) = \left[S'(\sigma^k) \right]^T S'(\sigma^k) \quad (13)$$

将式(12)与(13)代入(11)可以得到：

$$\Delta\sigma^k = -\left[\left[S'(\sigma^k) \right]^T S'(\sigma^k) \right]^{-1} \cdot \left[S'(\sigma^k) \right]^T [S(\sigma) - V] \quad (14)$$

其中 $\Delta\sigma^k = \sigma^{k+1} - \sigma^k$, k 为迭代次数，当迭代次数满足设定的次数时迭代将会停止。由于上述中对于海森矩阵的求解存在不确定性，因此引入惩罚项加以约束，此时目标函数为：

$$J(\sigma) = \frac{1}{2} \|S(\sigma) - V\|_2^2 + \frac{1}{2} \lambda \|L\sigma\|_2^2 \quad (15)$$

加入惩罚项后的迭代格式为：

$$J\Delta\sigma^k = -\left[\left[S'(\sigma^k) \right]^T S'(\sigma^k) + \lambda L \right]^{-1} \cdot \left[S'(\sigma^k) \right]^T [S(\sigma) - V] \quad (16)$$

2 实验设计

2.1 样本制备

本实验采用根茎类植物——萝卜的切块，作为实验样本。用圆柱管体制作出半径为 4.00 cm 的圆柱形萝卜切块，并用游标卡尺将萝卜切块的厚度分为 0.50 cm, 1.00 cm, 1.50 cm, 2.00 cm, 2.5 cm。

2.2 装置介绍

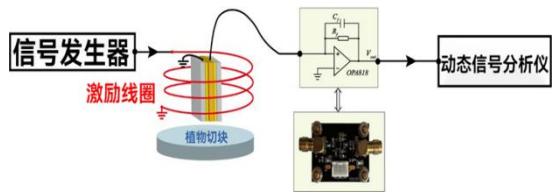


图 3 装置图

Fig. 3 Device diagram

实验装置如图 3 所示，信号发生器输出交变电流信号，输入到激励线圈。将根茎类切块，本文采用萝卜作为样本，置于激励线圈下方中心位置，通过磁电传感器检测感应磁场的变化，采集电压信号通过 OPA818 放大和 AD 转换最终存储于采集卡中，进一步通过计算机分析和磁感应断层成像方法反演出萝卜切块的电导率值。

2.3 实验数据

本实验激励线圈发射电流频率为 5 MHz，大小为 0.08 A，线圈内径为 30 mm，外径为 30.5 mm，厚度为 6 mm，匝数为 5 匝，电阻为 68 Ω。

表 1 激励线圈参数

Tab. 1 Parameters of the excitation coil

参数	取值
r1	30 mm
r2	30.5 mm
z1	50 mm
z2	56 mm
线圈匝数	5 匝
电阻	68Ω

采用磁电传感器分别对不同厚度切片进行测量，保持激励线圈与测量装置不动，通过移动切片位置获得二维磁场平面图，每次移动切片圆心跟 3*3 的正方形网格中心重合，测量并采集 9 次磁场信号，测量点位如图 4 所示。

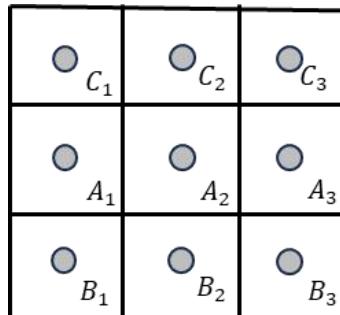


图 4 测量点位图

Fig. 4 Diagram of measuring points

3 实验结果

3.1 萝卜切片磁场响应仿真

建立电磁感应数值模拟模型，发射参数如表 1 所示。选取竖轴 z 与横轴 r 所在平面作为观测面，观测面关于 z 轴对称，如图 5 所示为磁场在 z-r 方向的分布，颜色代表磁场强度大小，单位是 T。

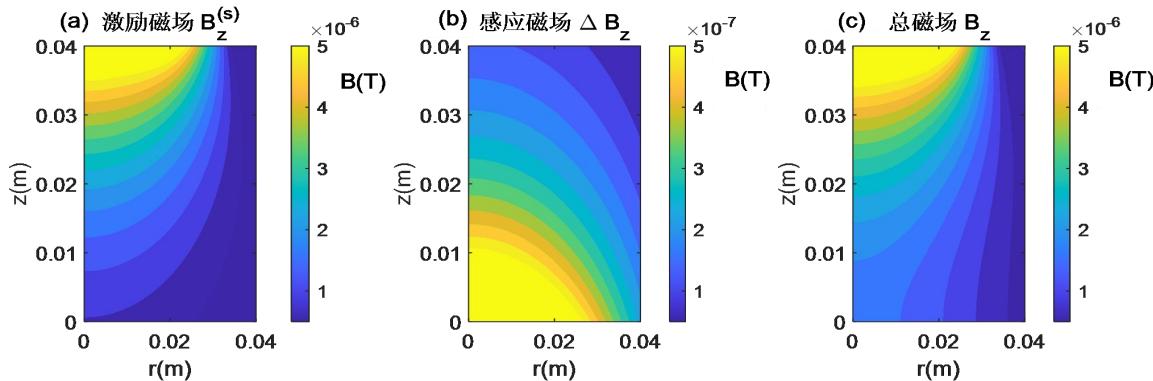


图 5 仿真磁场图

Fig. 5 Diagram of simulated magnetic field

从图 5 (a) 中可看出, 不同的 r 和 z 位置, 激励磁场强度有明显变化, 在黄色区域磁场强度较高, 最大值约为 4.8×10^{-6} T, 蓝色区域, 磁场强度较小, 最小值约为 1×10^{-6} T。高强度区集中在左上角, 对应线圈近场区域, 并沿 r 轴向和 z 轴衰减, 且 r 轴衰减比 z 轴更剧烈。图 5(b) 是根茎切块的感应磁场分布, 在 $z=0$ m 处, 感应磁场幅值最大, 约为激励磁场的幅值 $1/10$ 。图 5(c) 中是激励磁场与感应磁场叠加的总磁场分布, 整体分布与激励场相似, 底部出现局部极小值。

3.2 不同厚度切片的实测磁场变化

本研究搭建了如图 3 所示的实验装置, 测量不同厚度萝卜切片的感应磁场强度。设置线圈位于萝卜切片正上方, 保持激励线圈尺寸、激励电流幅值等参数设置不变, 固定切块半径, 切块的厚度分别是 5 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm, 如图 6 所示感应磁场随厚度、位置的变化曲线。

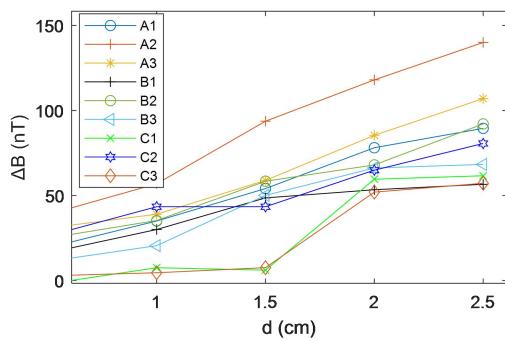


图 6 切块厚度图

Fig. 6 Diagram of cutting thickness

在图 6 中所有组别均在厚度 $d=2.5$ cm 处 ΔB 幅值最大。实验结果表明样本厚度增加, 感应磁场也随之增大。

A2 处的感应磁场曲线幅值最大, 随厚度变化, 磁场灵敏度约为 50 nT/cm, A1、A3、B2、C2 处的感应磁场曲线幅值次高, 磁场灵敏率约为 30 nT/cm; B3, B1, C1, C3 感应磁场曲线幅值最低, 磁场灵敏度约为 20 nT/cm, 位于激励线圈正下方的感应磁场对厚度变化的灵敏度更强。

3.3 位置对测量结果的影响

我们选取厚度为 25 mm 的植物切块。其磁场强度和所测点位分布如图 7 所示。

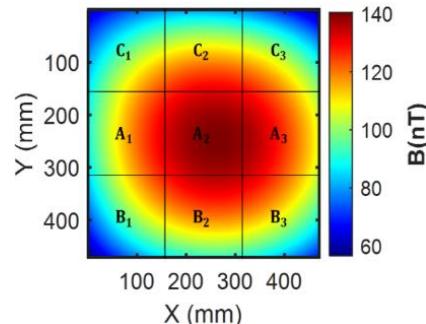


图 6 仿真点位图

Fig. 6 Diagram of simulated points

根据图 6 所示, 图中磁场强度呈现中心高、边缘低的分布特征, 表明测量位置与磁场强度显著相关: 位置越靠近中心, 磁场强度越大; 越靠近边缘, 磁场强度越小。综上分析, 在该测量平面内, 中心位置磁场强度最大, 并随径向向外移动而逐渐衰减。因此, 进行相关磁场测量及应用时, 必须考虑空间位置对测量结果的影响。

3.4 电导率反演结果

基于实测磁场值, 通过 MNR 迭代正则化成像算法, 获得电导率二维成像结果, 如图 8 所示。

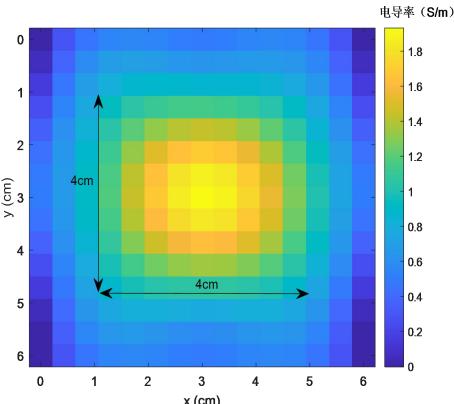


图 7 电导率成像结果

Fig. 7 Diagram of inversion

如图7所示,颜色呈现出从中心向边缘的梯度变化。中心的黄色区域电导率最大值可达约1.4—1.97 S/m,与萝卜的电导率范围基本一致。高电导率区域大致呈圆形分布,边界轮廓相对清晰,这表明反演结果能够有效区分不同电导率区域的边界,充分体现了算法对空间分布的解析能力。

4 结论

本文围绕基于磁感应断层成像(MIT)的根茎类植物电导率无损测量方法展开研究。研究中,通过设计并搭建专用的MIT测量系统,对不同厚度的萝卜切片样本进行了实验测量;随后采用MNR迭代正则化算法对

采集的磁场信号进行处理,并完成图像重建,最终获取了样本内部的电导率空间分布特征。实验结果表明,MIT技术能够精确捕捉植物内部的电导率异质性,且仿真数据与实测数据具有较高的一致性;分析显示,测量过程中的主要误差来源于环境干扰因素。

参考文献

- [1] 崔坤,王晓梅,宋丽润,等.甘薯的实用价值及在我国发展前景分析[J].吉林农业科学,2007,(03):63-5.
- [2] 陈柯铧,兴旺,王皓,等.根茎类作物贮藏器官的发育和膨大机理[J].植物生理学报,2024,60(12):1726-1736.
- [3] 裴占江,刘杰,史风梅,等.气候变化对我国农业生产的影响研究进展[J].黑龙江农业科学,2017,(08):12-118.
- [4] 游崇娟,王建美,田呈明.植物病害检测领域的电生理学研究进展[J].西北林学院学报,2010,25(01):118-122+153.
- [5] 崔之益,李蕊萍,胡加新,等.电导法在植物研究中应用[J].安徽农业学,2014,42(17):5358-5359+5366.
- [6] 熊宁,李琦,刘利,等.稻谷电导率测定方法的研究[J].粮油食品科技,2013,21(04):68-71.