

一种适用于粮食烘干机的多导体阵列式电容装置及其测量分析

刘 聪 刘 珏 陈达畅 方 焯

(武汉轻工大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430048)

摘要: [目的] 针对传统单点湿度测量在复杂的烘干环境中的局限性, 设计一种多导体阵列式电容装置用于烘干机内部的水分含量测量。[方法] 通过布置 8 导体棒阵列, 测量所有两相邻导体棒间的电容, 反演计算出间隔区域平均介电常数, 实现对粮食烘干过程中的实时水分监控。[结果] 基于树莓派 Pico W 控制的 FDC2214 电容传感器实现了高精度电容值的测量, 验证了含水率变化区域介电常数与水质量之间的关系并形成了介电常数二维分布图。在不均匀的湿度分布环境下, 装置能快速稳定地检测水分扩散情况, 并精确拟合为改进的 Dobson 模型, 在拟合过程中, 介电常数标准差最大值为 3.98, 平均值为 1.27。[结论] 通过调整试验装置物理结构, 可测量任意单位空间粮食的平均水分分布情况。

关键词: 粮食烘干机; 电容传感器; 水分测量; 多导体阵列; 介电常数

A multi-conductor array capacitor device for grain dryers and its measurement analysis

LIU Cong LIU Jue CHEN Dachang FANG Chao

(School of Electrical and Electronic Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430048, China)

Abstract: [Objective] To address the limitations of traditional single-point moisture measurement in complex drying environments, a multi-conductor array capacitor device was designed for moisture content measurement inside a grain dryer. [Methods] An array of 8 conductor rods was arranged to measure the capacitance between each pair of adjacent rods, from which the average dielectric constant in the inter-rod regions was calculated to enable real-time moisture monitoring during the grain drying process. [Results] High-precision capacitance measurements were achieved using an FDC2214 capacitive sensor controlled by a Raspberry Pi Pico W. The relationship between the dielectric constant in regions with varying moisture content and the corresponding water weight was validated, generating a two-dimensional dielectric constant distribution map. In environments with uneven humidity distribution, the device rapidly and stably detected moisture diffusion and accurately fitted the improved Dobson model. During the fitting process, the maximum standard deviation of the dielectric constant was 3.98, with an average value of 1.27. [Conclusion] By adjusting the physical structure of the test setup, the device can measure the average moisture distribution in any spatial unit of grain.

Keywords: grain dryer; capacitive sensor; moisture measurement; multi-conductor array; dielectric constant

烘干机作为一种常见的农业和食品加工设备, 具有高效率、处理量大的特征。其通过热空气的循环流动快速干燥各种物料, 在这一过程中, 精确的水分控制不仅能够确保物料在烘干过程中达到理想的干燥程度, 还能避免因过度干燥导致的能源浪费或因干燥不足引起的霉变和质量

下降。因此, 实时监测和调节烘干过程中空气湿度和物料水分含量, 是提高烘干效率和保证产品质量的关键。

目前, 粮食中水分含量测定方法主要有传统的干燥法、电测法、微波法等。其中, 烘箱干燥法是国际通用的标准方法, 精度高, 但耗时长, 适用于实验室环境。微波

基金项目: 湖北省农机装备补短板核心技术应用攻关项目(编号: HBSNYT202222)

通信作者: 刘珏(1985—), 男, 武汉轻工大学副教授, 博士。E-mail: whliujue@sina.com

收稿日期: 2024-09-25 **改回日期:** 2025-02-11

引用格式: 刘聪, 刘珏, 陈达畅, 等. 一种适用于粮食烘干机的多导体阵列式电容装置及其测量分析[J]. 食品与机械, 2025, 41(4): 97-104.

Citation: LIU Cong, LIU Jue, CHEN Dachang, et al. A multi-conductor array capacitor device for grain dryers and its measurement analysis[J]. Food & Machinery, 2025, 41(4): 97-104.

法作为一种非破坏性检测方法,具备检测速度快、精度高的特点,但其成本较高,易受样品特性影响。电测法包括电阻法和电容法,因其快速、便捷的特性被广泛用于粮食的收购、贮藏环节^[1]。

电容法测定水分含量具有结构简单、成本低、维护方便的优势,尤其适合在线快速检测和高含水量样品的测量。其非接触式测量避免了对样品的破坏,适用于粮食收获、烘干和贮藏等环节的大批量检测。虽然可能受粮食品种和温度的影响,但通过参数校正可提高精度。因此,电容法凭借操作简便、检测快速和适应性强,已成为现代粮食水分检测的重要方法之一。

在土壤水分检测方面,Okash 等^[2-3]开发了一种低成本电容式土壤水分传感器,并验证了其在温室灌溉管理中的高效性和可靠性;González-Teruel 等^[4]则进一步扩展了该传感器在不同土壤类型灌溉管理中的应用。在农业灌溉和作物监测方面,Helmy 等^[5-6]通过电容传感器优化了灌溉水资源的利用;Tan 等^[7]展示了电容法在测量生物物质体积密度中的应用潜力。在粮食水分检测领域,可飞龙等^[8-9]分别设计了基于介电常数变化的平行板电容传感器和圆筒式电容传感器,验证了电容法在粮食水分非接触检测中的高精度和稳定性;Besharati 等^[10]开发的模型进一步提升了种子水分含量预测的准确性。在粮食烘干过程中的智能检测方面,陈舒等^[11-12]结合电容传感器与智能控制技术,实现了对烘干过程中的水分、温度的实时监控和自动化调节。

在粮食烘干机中,传统的单点湿度测量方法面临较多挑战,难以满足现代粮食烘干工艺对精确控制的需求。首先,烘干过程中湿度随时间快速变化且高度不均,尤其在干阶段的干燥速率各异,还容易受到热气流、风速、粮层厚度等因素影响,单点测量无法及时捕捉到局部湿度的波动,难以全面反映整个粮层的湿度情况。其次,烘干机内部结构复杂,气流流动路径多变,单点测量位置的选择困难,测量值容易受到空气流动、温度变化等干扰,不具备代表性。此外,谷物介电特性不仅与湿度相关,还受到激励信号频率、谷物填充密度和外界温度等多重因素的影响,这些均会干扰测量精度与重复性^[13]。

研究拟采取多区域测量的方法,设计一种可扩展的 8 导体棒阵列式电容传感器模块,在烘干室内布置多个金属导体棒阵列,使任意两个相邻导体棒间形成分布式电容,通过测量多组导体棒之间的电容值从而计算出不同区域的平均介电常数,生成湿度分布的二维图像,进而实现对烘干过程湿度的实时、全面监测,旨在为提升烘干均匀性、优化干燥参数调控、提高粮食品质及能效管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

去壳黍米(含水率为 16%):沁州黄,市售。

1.1.2 主要仪器设备

多导体阵列式电容测量装置:自行设计;

香山精准厨房秤:EK3852 型,广东香山衡器集团。

1.2 试验方法

1.2.1 电容传感器芯片及电容值计算 采用 FDC2214 传感器芯片进行电容值计算,量程为 0.5 pF~250 nF,分辨率最高可达 28 位。通过测量 LC 谐振电路的谐振频率来确定传感器的电容值,LC 谐振电路的谐振频率与电感和电容的乘积有关:

$$f_{\text{sensor}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_{\text{sensor}}}}, \quad (1)$$

式中:

f_{sensor} ——谐振频率,Hz;

L ——电感,H;

C_{sensor} ——总电容值,F。

FDC2214 输出的数字量(即 DATA 值)与传感器的频率关系为

$$\text{DATA} = \frac{f_{\text{sensor}}}{f_{\text{ref}}} \times 2^{28}, \quad (2)$$

式中:

f_{ref} ——参考频率,Hz。

在 LC 电路中,除未知电容外,还并有一个已知电感 L 和一个已知电容 C ,计算未知电容时需减去已知电容 C ,即

$$C_{\text{未知}} = C_{\text{sensor}} - C_0. \quad (3)$$

联立式(1)~式(3)得

$$C_{\text{未知}} = \frac{1}{L2\left(\pi \cdot \frac{\text{DATA} \cdot f_{\text{ref}}}{2^{28}}\right)^2} - C_0. \quad (4)$$

1.2.2 多导体系统中部分电容的测量 采用 2×4 导体棒阵列模块,以 8 个导体棒为一组测量模块,通过级联扩展的方式可有效地覆盖烘干机内部不同区域的湿度分布,同时又不会增加电容检测芯片和微控制器数量,使系统更易于构建和维护。此外,8 导体棒配置在空间上既能保证数据的全面性,也能控制每对导体棒间电容测量的复杂度,以在测量精度与系统实现之间取得平衡。

作为多导体系统,两个相邻导体间部分电容无法直接测量,需要根据计算得出,而导体棒数量越多,多元多项式的求解难度就会增加,根据刘瑞芳等^[14]的方法,采用两路短接法来计算部分电容。

如图 1 所示,以导体棒 A1A2 为例。

根据两路短接法推导得到三者满足关系式:

$$C_{eqA1A2} = C_{A1A2} + C_{A1地\|A2地}, \quad (5)$$

$$C_{A1地\|A2地} = \frac{C_{A1地} \times C_{A2地}}{C_{A1地} + C_{A2地}}. \quad (6)$$

根据式(5)和式(6)可以得到 A1 与 A2 间的本征电容:

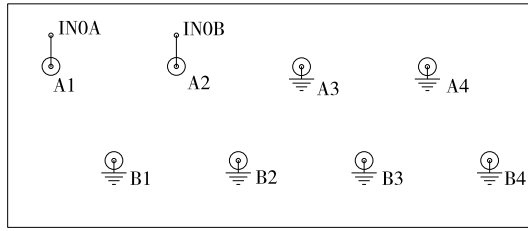


图1 导体棒示意图

Figure 1 Conductor bar schematic diagram

$$C_{A1A2} = \frac{C_{A1地} \times C_{A2地}}{C_{A1地} + C_{A2地}} - Ceq_{A1A2}, \quad (7)$$

式中:

Ceq_{MN} ——等效电容($C_{未知}$)。

对于8导体系统,可以依次将相邻两导体棒轮流接地测量,对于任意相邻两导体棒MN都可以按式(8)推导出其本征电容。

$$C_{MN} = \frac{C_{M地} \times C_{N地}}{C_{M地} + C_{N地}} - Ceq_{MN}. \quad (8)$$

1.2.3 介电常数换算 电容值无法直接反映谷物含水量,需将电容值与导体棒尺寸、间距等数据换算为介电常数才能反映含水量,已知平行圆柱形导体棒的电容与介电常数间的关系为:

$$C = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r L}{\ln(d/r)}, \quad (9)$$

式中:

C ——两平行圆柱形导体棒间的电容,H;

ϵ_0 ——真空中的介电常数,F/m;

ϵ_r ——介质的相对介电常数;

L ——导体棒的长度,m;

d ——两导体棒之间的中心距离,m;

r ——导体棒的半径,m。

通过式(9)可以将本征电容 C_{MN} 换算成导体棒MN间的介电常数 ϵ_r ,再通过后续试验反演出 ϵ_r 和含水率的具体关系。

1.2.4 采集电路硬件及工作流程 采集电路以树莓派Pico W作为核心控制单元,利用FDC2214电容检测芯片实现空气湿度的精确测量。树莓派Pico W自带Wi-Fi功能,支持数据通过无线网络传输到上位机或云端,简化了布线工作。

该电路使用两个ADG706多路复用器来选择不同的导体棒组合,两个多路复用器的输入端均连接8个导体棒,输出端接入FDC2214的两个输入通道。FDC2214模块则通过检测电容变化引起的频率偏移,实现高精度电容测量。可控硅开关控制模块由BT169D可控硅组成,控制导体棒的接地状态,从而消除测量过程中寄生电容的影响。主控模块包括树莓派Pico W和连接导体棒的排针、排母,负责各模块的协调工作及数据处理和传输。通过测量频率变化,系统可以反演烘干机内部的含水率分布。软件流程如图2所示,电路设计如图3所示。

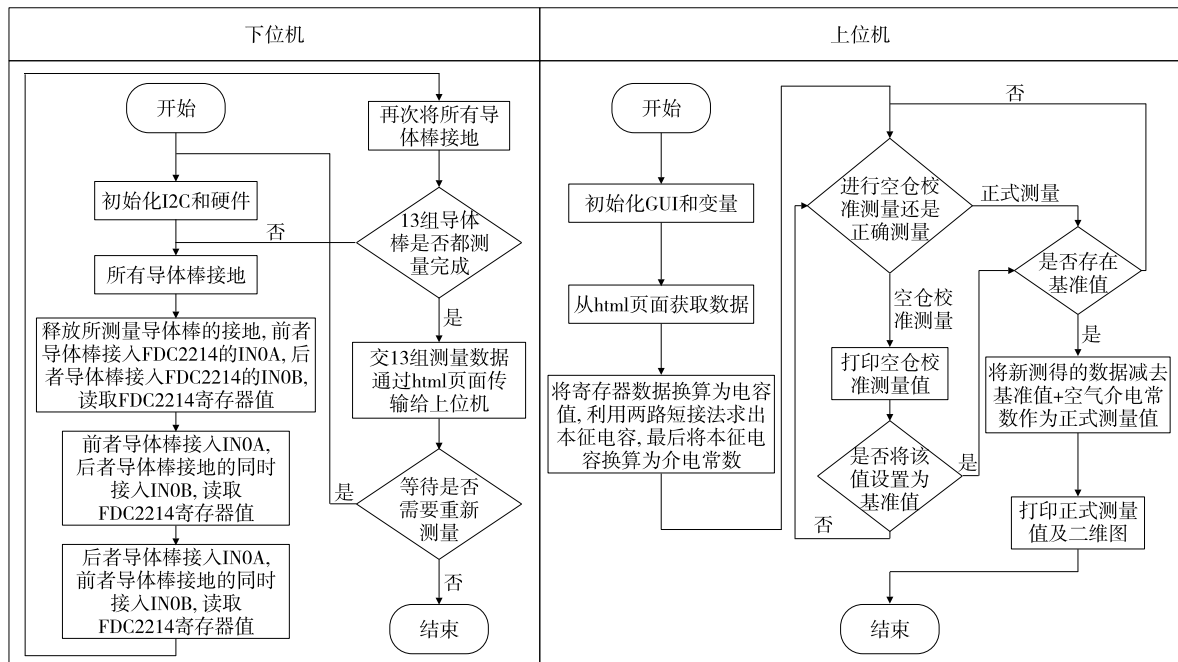


图2 软件流程图

Figure 2 Software flowchart

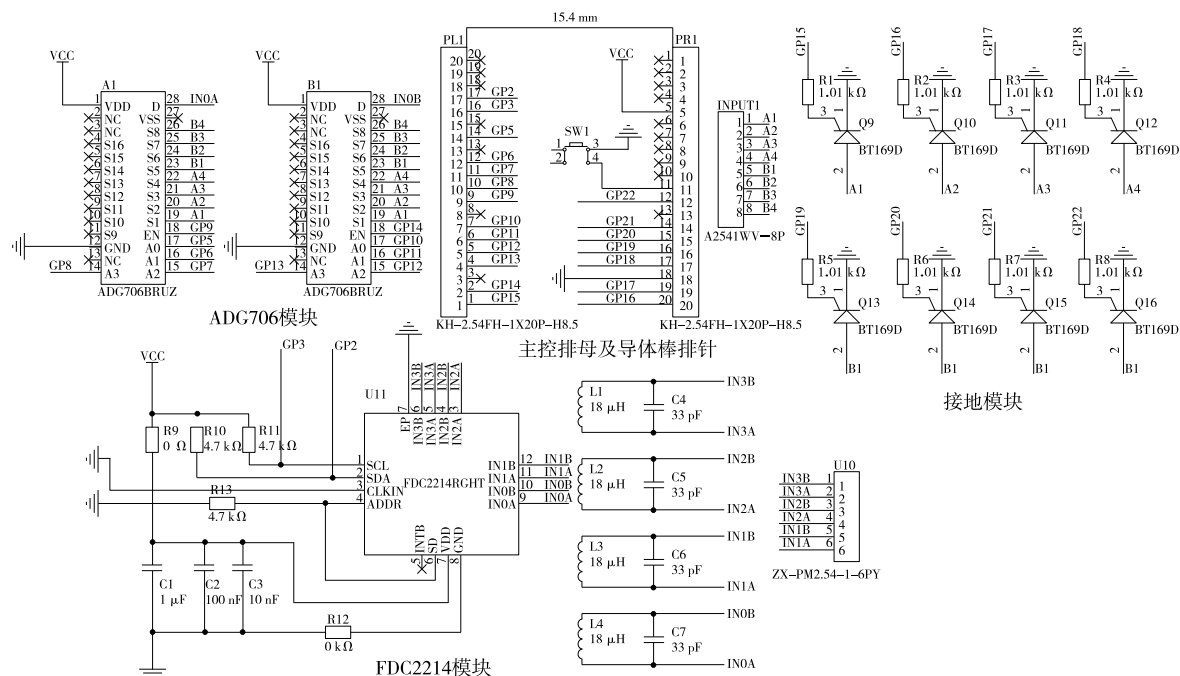


图 3 采集电路图

Figure 3 Acquisition circuit schematic diagram

1.2.5 试验装置 将 8 个导体棒分成 13 组相邻导体棒对进行测量, 简易仓采用 3D 打印制作, 内部长度为 100.9 mm, 宽度为 58.1 mm, 深度为 51.5 mm, 导体棒长度为 51.5 mm, 直径为 1.5 mm, 导体棒圆心间距为 26 mm。试验材料为干燥去壳黍米, 初始含水量为 16%, 如图 4 所示。

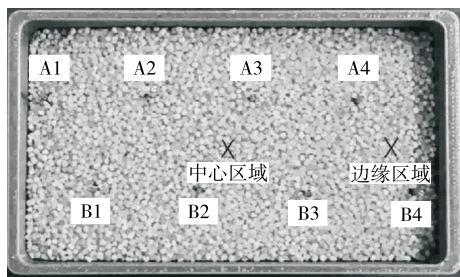


图 4 简易仓实物图

Figure 4 Photo of the simple warehouse

1.2.6 试验步骤 装置净质量 138.4 g, 干燥去壳黍米 221.5 g。由于电路本身的干扰会使得空仓测量时有一个平均大小为 20.351 7 的介电常数偏置, 为了消除该影响, 在装入物料前的空仓状态下先进行一次校准测量, 消除偏置, 并加上空气介电常数 1.000 6 作为默认值, 将其设置为基准值后向简易仓中不同位置添加不同质量的水来观察介电常数的变化。

如图 4 所示, A3 与 B2 连线中点处于模拟仓中心区域, A4 与 B4 连线中点处于模拟仓边缘区域, 通过在这两个区域逐渐添加水量并观察这两点的测量值, 分别得出中心介

电常数和边缘介电常数与其对应区域含水率的关系。

1.3 数据处理

采用 Matplotlib 软件绘图, 使用 NumPy 库进行绝对差值方式的标准差计算, 使用 SciPy 库进行曲线拟合。二维分布图由 contourf 函数生成, 使用高斯权重扩散, 影响介电常数扩散的范围设定为 30, 等高线层级设定为 500 层。

2 结果与分析

2.1 试验结果

在中心部分依次增加水量, 每次加水间隔 5 min, 每隔 3 个数据生成一次导棒间平均介电常数数据图和介电常数二维分布图, 如图 5 所示。

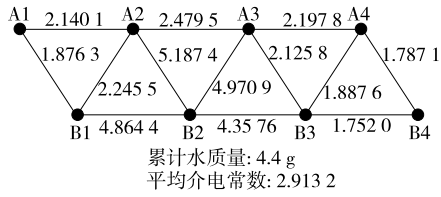
在边缘部分依次增加水量, 每次加水间隔 5 min, 每隔 3 个数据生成一次导棒间平均介电常数数据图和介电常数二维分布图, 如图 6 所示。

2.2 数值分析及结果讨论

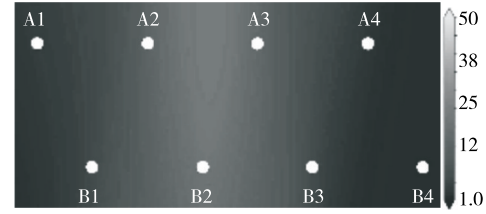
为了分析水质与介电常数之间的关系, 将两组试验数据中的水质与边缘介电常数、水质与中央介电常数、水质与平均介电常数的关系进行对比, 结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 中央介电常数和边缘介电常数在不同的水量区间出现了激增。中央滴水试验中, 中央介电常数在水质量为 4~6 g 时出现激增, 边缘介电常数在 24~28 g 时出现激增; 边缘滴水试验中, 边缘介电常数在水质量为 2~6 g 时出现激增, 而中央介电常数在 19~22 g 时出现激增。

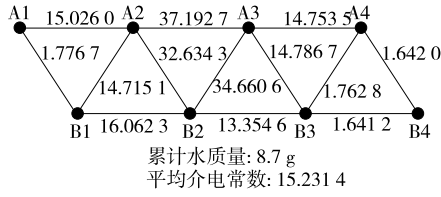
2.2.1 数值分析 为了更好地拟合介电常数与水质量的关系, 将 Dobson 模型应用至混合谷物电容测量中^[15]。



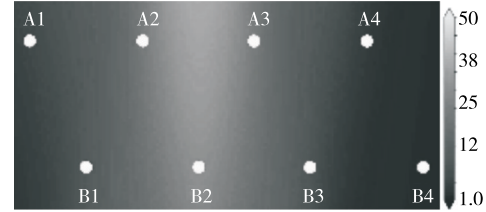
(a) 4.4 g时数据图



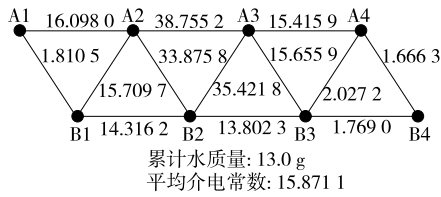
(b) 4.4 g时二维分布图



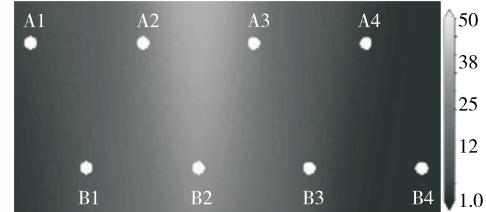
(c) 8.7 g时数据图



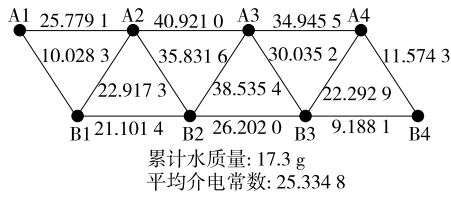
(d) 8.7 g时二维分布图



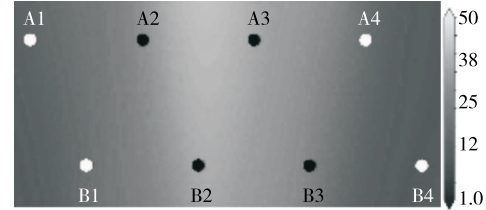
(e) 13.0 g时数据图



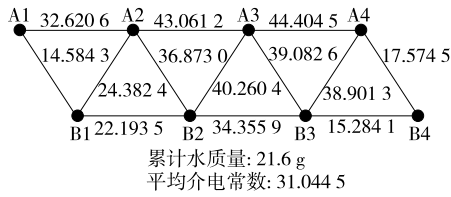
(f) 13.0 g时二维分布图



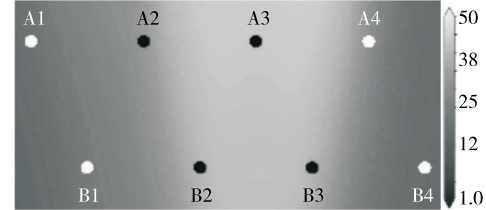
(g) 17.3 g时数据图



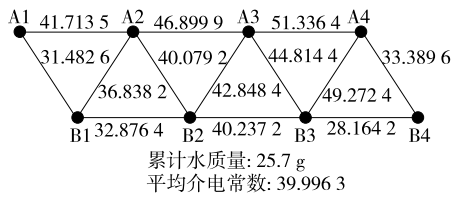
(h) 17.3 g时二维分布图



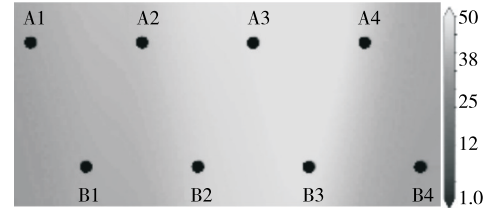
(i) 21.6 g时数据图



(j) 21.6 g时二维分布图



(k) 25.7 g时数据图



(l) 25.7 g时二维分布图

图5 中心滴水的试验数据

Figure 5 Experimental data of central dripping

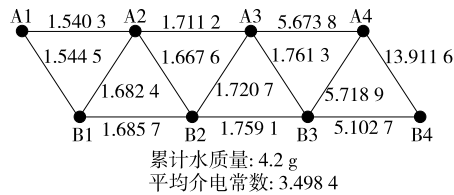
$$C^a = C_{\text{谷}}^a p_{\text{谷}} + C_{\text{水}}^a p_{\text{水}} + C_{\text{气}}^a p_{\text{气}} = \left[\frac{\pi \epsilon_0 L}{\ln(d/r)} \right]^a (\epsilon_{\text{谷}}^a p_{\text{谷}} + \epsilon_{\text{水}}^a p_{\text{水}} + \epsilon_{\text{气}}^a p_{\text{气}}), \quad (10)$$

式中:

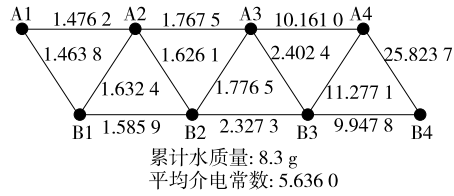
$C_{\text{谷}}, C_{\text{水}}, C_{\text{气}}, \epsilon_{\text{谷}}$ ——谷物、谷物中含有的束缚水以及空气的电容值, F;

$C_{\text{谷}}, C_{\text{水}}, C_{\text{气}}, \epsilon_{\text{谷}}, \epsilon_{\text{水}}, \epsilon_{\text{气}}$ ——谷物、谷物中含有的束缚水以及空气的相对介电常数;

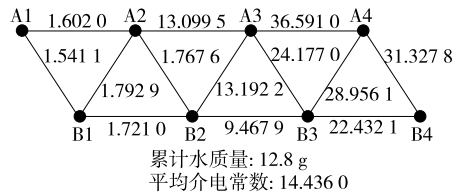
$p_{\text{谷}}, p_{\text{水}}, p_{\text{气}}$ ——谷物、谷物中含有的束缚水以及空气



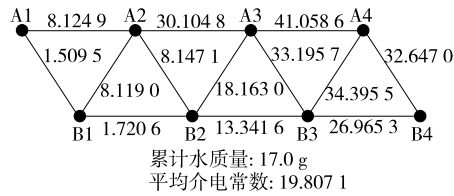
(a) 4.2 g时数据图



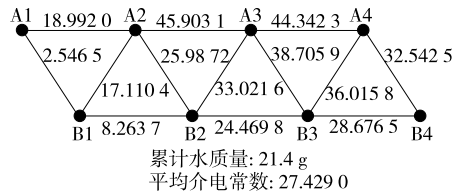
(c) 8.3 g时数据图



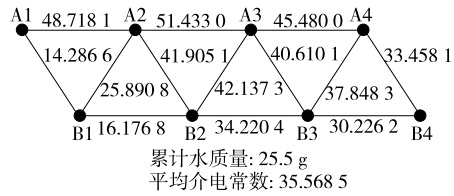
(e) 12.8 g时数据图



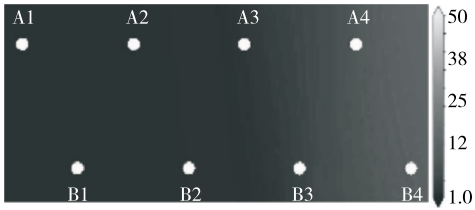
(g) 17.0 g时数据图



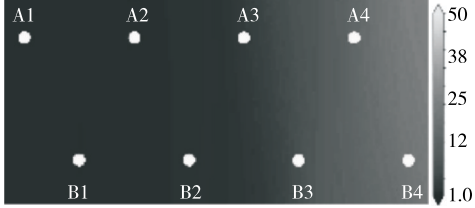
(i) 21.4 g时数据图



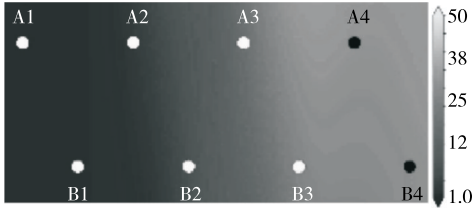
(k) 25.5 g时数据图



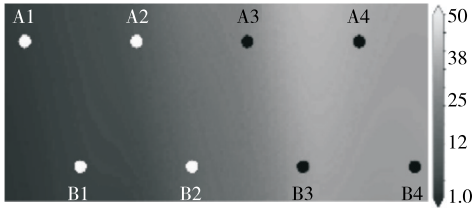
(b) 4.2 g时二维分布图



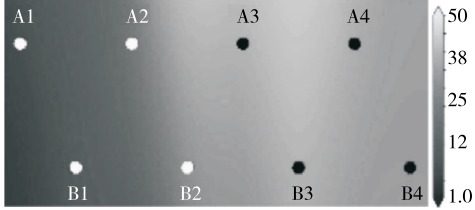
(d) 8.3 g时二维分布图



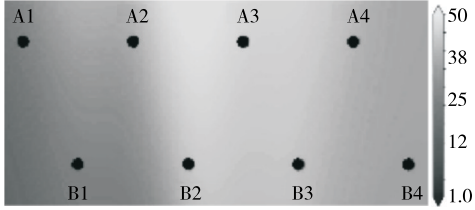
(f) 12.8 g时二维分布图



(h) 17.0 g时二维分布图



(j) 21.4 g时二维分布图



(i) 25.5 g时二维分布图

图 6 边缘滴水的试验数据

Figure 6 Experimental data of edge dripping

在总物料中的体积百分比;

α ——物料系数(与谷物品种及粒形、粒度相关,同批次物料 α 值基本稳定)。

用 Δ 来表示滴水量,滴入的水可看作是取代谷物中空气的体积,将 $\epsilon_{\text{谷}}^{\alpha}$ 进行泰勒级数展开并保留前两项,可以得到:

$$C^{\alpha} = \left[\frac{\pi \epsilon_0 L}{\ln(d/r)} \right]^{\alpha} [(1 + \alpha \ln \epsilon_{\text{谷}}) p_{\text{谷}} + (1 + \alpha \ln \epsilon_{\text{水}}) (p_{\text{水}} + \Delta) + (1 + \alpha \ln \epsilon_{\text{气}}) (p_{\text{气}} - \Delta)], \quad (11)$$

化简得

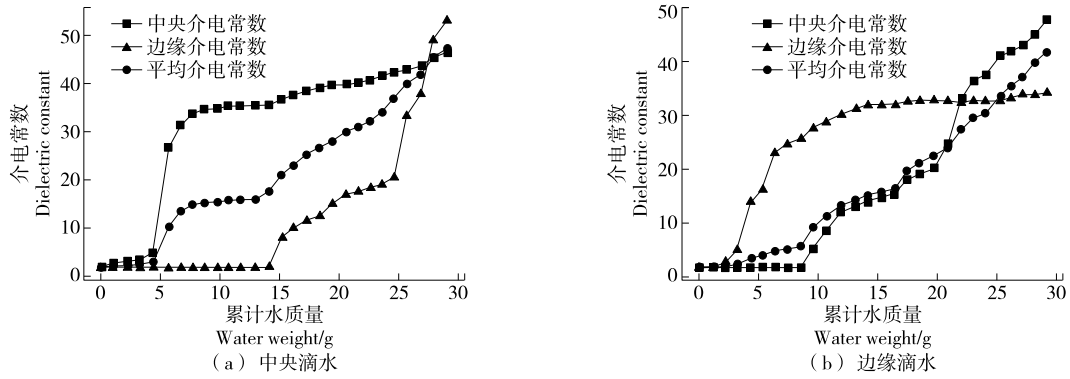


图7 中央滴水边缘滴水的介电常数变化情况

Figure 7 Changes in dielectric constant with central dripping and edge dripping

$$C^a = \left[\frac{\pi \epsilon_0 L}{\ln(d/r)} \right]^a [1 + \alpha (\ln \epsilon_{\text{谷}} p_{\text{谷}} + \ln \epsilon_{\text{水}} p_{\text{水}} + \ln \epsilon_{\text{气}} p_{\text{气}}) + \Delta \alpha (\ln \epsilon_{\text{水}} - \ln \epsilon_{\text{气}})] \quad (12)$$

由于简易仓及其中物料初始条件固定, $(\ln \epsilon_{\text{谷}} p_{\text{谷}} + \ln \epsilon_{\text{水}} p_{\text{水}} + \ln \epsilon_{\text{气}} p_{\text{气}})$ 为常数, 可作为拟合参数 K_1 , 常温下计算得到 $(\ln \epsilon_{\text{水}} - \ln \epsilon_{\text{气}}) = 4.38$, 同时试验物料品种唯一,

物料系数 α 也作为拟合参数, 由于测量系统为线性系统, 为了消除寄生电容、零点漂移及其他的线性影响, 为拟合公式增加线性参数 K_3 、 K_4 , 由于试验存在水分扩散滞后效应, 设置滞后参数 K_2 , 再结合式(9)得:

$$\epsilon_r = K_3 \{ [1 + K_1 \alpha + 4.38 (\Delta - K_2) \alpha^{\frac{1}{\alpha}}] + K_4 \} \quad (13)$$

通过对扩散均匀后的数据点进行拟合, 得到如图8所示的拟合曲线。

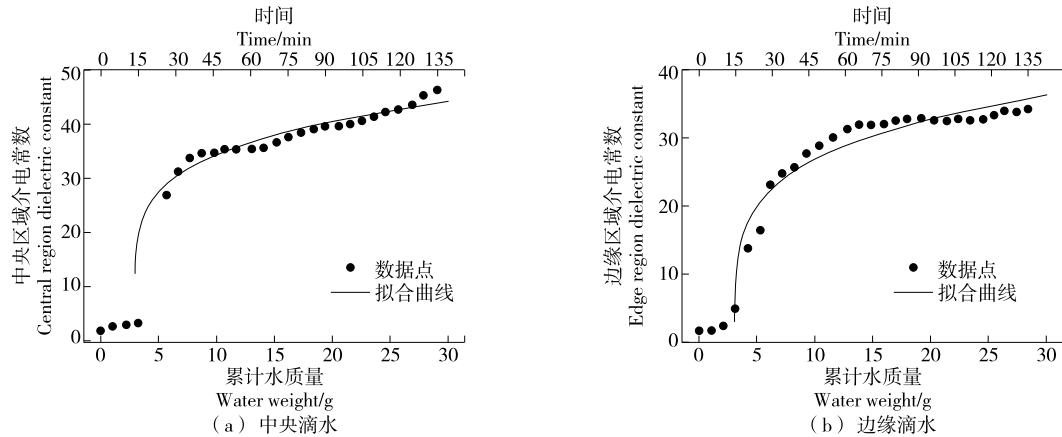


图8 中央滴水与边缘滴水的介电常数—水质量曲线

Figure 8 Dielectric constant vs water weight curve during central dripping and edge dripping

中央滴水试验中, 拟合系数 $K_1=1.29$, $K_2=3.26$, $K_3=11.74$, $K_4=2.17$, $\alpha=5$, 标准差最大值为2.54, 最小值为0.005 5, 平均值为1.02; 边缘滴水试验中, 拟合系数 $K_1=1.29$, $K_2=3.43$, $K_3=11.15$, $K_4=-3.58$, $\alpha=5$, 标准差最大值为3.98, 最小值为0.202 9, 平均值为1.27。

2.2.2 结果讨论 由图7可知, 在特定区域出现了介电常数的激增, 该现象的原因为水分扩散滞后效应。Patera等^[16]研究表明, 水分在带孔隙介质中的扩散通常表现出滞后效应, 即吸湿和解吸路径不同, 导致水分在进入和离开材料时有不同的行为。去壳黍米与木材均为多孔结构, 有一定的相似性。向去壳黍米中滴水时, 水分首先在其多孔结构中进行缓慢扩散。此时, 水分的吸附主要受到去

壳黍米颗粒表面毛细管作用和内部孔隙结构的影响, 水分通过毛细作用逐渐渗透到内部, 该阶段吸附的水量较少, 介电常数增加缓慢。当水分逐渐渗透到去壳黍米的内部结构并达到饱和时, 水分开始在去壳黍米颗粒间的孔隙中积聚。此时, 模拟仓内部的水分开始显著增加, 从而引发介电常数的激增。通过试验可得出水分扩散初期的扩散系数, 由式(13)拟合并消除其时滞效应。

图8中改进 Dobson 模型对试验数据进行拟合后发现, 边缘滴水试验数据曲线与数据点的贴合度不如中央滴水试验数据。根据帅嘉伟^[17]的研究, 当水分在靠近边界区域时, 扩散受到阻碍, 导致该区域的水分累积较慢, 扩散速率降低, 而在中央区域水分扩散较为自由, 水分迅

速向这些未饱和区域扩散,导致这些区域的介电常数更快增长。因此,在边缘滴水试验中,边缘区域在水分饱和和后介电常数的增加相对中央滴水试验更为缓慢。最终,由于水分更容易向没有边界效应的中央区域扩散,中央区域的介电常数会超过边缘区域。这种区域不均匀的扩散效应可以从图 6 中的二维分布图观察到。

综上,该装置能较好地 将仓中物料的湿度分布通过二维图展示,且能较精确地拟合为文中改进的 Dobson 模型。其湿度扩散延迟 $< 15 \text{ min}$,拟合误差最大处为 13.7% 且随水分扩散均匀度增大逐渐收敛。

3 结论

设计了一种基于 8 导体棒阵列的电容传感器,用于烘干机内部粮食含水率的测量。通过多区域电容测量的方法,有效克服了传统单点湿度测量在烘干机复杂环境下的局限性。试验数据表明,在水分扩散均匀的滴水区域,介电常数与水质量的关系可以用式(13)来拟合,验证了试验方法在实时监测和控制粮食烘干过程中的可行性和准确性。试验仍存在一定的局限性,例如在水分扩散不均匀部分的介电常数的变化不能很好地贴合拟合曲线,还需进行更加细致的实验验证。后续可通过结合不同的算法模型(如 Maxwell-Garnett 或 Bruggeman 混合模型),对测量数据进行更加精确的拟合。同时,考虑到不均匀介质中的不同组分可能具有显著的介电常数差异,应进一步研究各组分的相对体积浓度对整体介电响应的贡献,尤其是在高不均匀度条件下的表现。

参考文献

- [1] 杜章辉,刘珏,张永林. COMSOL 谷物水分检测棒体仿真与优化[J]. 武汉轻工大学学报, 2024, 43(3): 112-119.
DU Z H, LIU J, ZHANG Y L. Simulation optimization and experimental validation of grain moisture detection probe body based on COMSOL[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2024, 43(3): 112-119.
- [2] OKASHA A M, IBRAHIM H G, ELMETWALLI A H, et al. Designing low-cost capacitive-based soil moisture sensor and smart monitoring unit operated by solar cells for greenhouse irrigation management[J]. Sensors, 2021, 21(16): 5 387.
- [3] PLACIDI P, GASPERINI L, GRASSI A, et al. Characterization of low-cost capacitive soil moisture sensors for IoT networks[J]. Sensors, 2020, 20(12): 3 585.
- [4] GONZÁLEZ-TERUEL J D, TORRES-SÁNCHEZ R, BLAYA-ROS P J, et al. Design and calibration of a low-cost SDI-12 soil moisture sensor[J]. Sensors, 2019, 19(3): 491.
- [5] HELMY H S, ABUARAB M E, ABDELDAYM E A, et al. Field-grown lettuce production optimized through precision irrigation water management using soil moisture-based capacitance sensors and biodegradable soil mulching[J]. Irrigation Science, 2024, 43(2): 1-26.
- [6] SHENG Z T, LIAO Y Y, ZHANG S, et al. A portable pull-out soil profile moisture sensor based on high-frequency capacitance

- [J]. Sensors, 2023, 23(8): 3 806.
- [7] TAN Y S, MIAO Z W, ABDUL M M, et al. Electrical capacitance as a proxy measurement of miscanthus bulk density, and the influence of moisture content and particle size[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 134: 102-108.
- [8] 可飞龙,汪毓铎,李茜. 一种高精度粮食水分测量传感器电路设计[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2018, 33(4): 77-81.
KE F L, WANG Y D, LI Q. Experimental study on capacitive grain moisture measurement based on MS3110[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2018, 33(4): 77-81.
- [9] 罗承铭. 基于电容法的谷物水分检测系统研究与设计[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2011: 58.
LUO C M. Research and design of a grain moisture detection system based on capacitive method[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2011: 58.
- [10] BESHARATI B, LAK A, GHAFARI H, et al. Development of a model to estimate moisture contents based on physical properties and capacitance of seeds[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 318: 112513.
- [11] 陈舒. 基于混流式烘干机的谷物含水率在线检测系统研究与设计[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2021: 62.
CHEN S. Research and design of online measurement system of grain moist content based on friction dryer[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021: 62.
- [12] 张虎. 新型粮食烘干机智能测控系统[D]. 长春: 吉林农业大学, 2012: 61.
ZHANG H. New intelligent system of measurement and control for grain dryer[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2012: 61.
- [13] 王容宇. 谷物湿度传感器设计及实验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2019: 47.
WANG R Y. Design and experimental study of grain humidity sensor[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019: 47.
- [14] 刘瑞芳,陈嘉垚. 多导体静电独立系统部分电容的测量[J]. 电气电子教学学报, 2017, 39(2): 89-93.
LIU R F, CHEN J Y. Measurement of the partition capacitance of independent electrostatic multiple conductors system[J]. Journal of Electrical & Electronic Education, 2017, 39(2): 89-93.
- [15] 刘珏. 一种基于总重检测的谷物干燥快速定标方法[J]. 武汉轻工大学学报, 2018, 37(2): 86-90.
LIU J. A fastcalibration method in grain drying based on total weight detection[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2018, 37(2): 86-90.
- [16] PATERA A, DERLUYN H, DEROME D, et al. Influence of sorption hysteresis on moisture transport in wood[J]. Wood Science and Technology, 2016, 50(2): 259-283.
- [17] 帅嘉伟. 非饱和土壤水分扩散率和渗透系数的计算方法研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2022: 47.
SHUAI J W. Research on the test method of water diffusivity and infiltration coefficient of unsaturated soil[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2022: 47.