

基于电容层析成像的包装大米水分检测传感器研究

蒋莹莹¹, 邓梦瑶¹, 杜卓昕¹, 周越¹, 石天玉^{2,3}, 杨东^{2,3}

(1. 沈阳理工大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110159; 2. 国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037;
3. 粮食储运国家工程研究中心, 北京 100037)

摘要: 包装大米水分快速无损检测是确保其在储运环节质量安全的有效手段。首先, 为了探究包装大米水分的非破坏性检测方法, 开展基于电容层析成像(ECT)技术的研究, 通过数值模拟分析, 构建一套适用于包装粮实际尺寸的三维立体式 ECT 传感器仿真模型(40 cm × 12 cm × 60 cm), 并完成其正问题求解。其次, 进一步对阵列电极传感器的性能参数进行优化研究, 综合分析传感器极板的宽度、高度、极板上下间距、屏蔽层厚度等结构参数对测量空间的灵敏度分布均匀性、电容的动态测量范围及重构图像相对误差三项评价指标的影响规律。通过设计正交试验, 对比分析各个结构参数对三项指标的评价结果, 最终确定了一组性能最优的 ECT 传感器结构参数, 即极板高为 7 cm、极板宽为 5 cm、极板上下间距为 6.5 cm、屏蔽层厚度为 6.5 cm。最后, 采用 Landweber 算法进行图像重构并完成效果验证, 结果表明重构图像能够基本映射出高介电常数区域(高含水率大米)分布位置, 但交界处图像质量还有待提升。研究结果有望为包装成品粮水分 ECT 检测系统的研发提供理论依据。

关键词: 大米水分检测; 电容层析成像; 传感器仿真; 图像重构

中图分类号: TB937 文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2025.05.007

Research on Capacitance Tomography Sensor for Moisture Detection of Packaged Rice

JIANG Yingying¹, DENG Mengyao¹, DU Zhuoxin¹, ZHOU Yue¹, SHI Tianyu^{2,3}, YANG Dong^{2,3}

(1. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 2. Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China; 3. National Engineering Research Center of Grain Storage and Logistics, Beijing 100037, China)

Abstract: Rapid nondestructive detection of moisture in packaged rice is an effective means to ensure its quality and safety in storage and transportation. Firstly, in order to explore the non-destructive moisture detection method of packaged rice, research based on capacitance tomography (ECT) technology is carried out, and a set of three-dimensional stereo ECT imaging sensor simulation model (40 cm × 12 cm × 60 cm) applicable to the actual size of packaged grains is constructed through numerical simulation analysis and its forward problem solving is completed. Secondly, the performance parameters of the array electrode sensor are further optimized to comprehensively analyze the influence laws of the structural parameters such as the width and height of the sensor's pole plate, the spacing between the top and bottom of the pole plate, and the thickness of the shielding layer on the three evaluation indexes, namely, the uniformity of the sensitivity distribution in the measurement space, the dynamic measurement range of the capacitance, and the relative error of the reconstructed image. By designing orthogonal tests and comparing and analyzing the evaluation

results of each structural parameter on the three indexes, a set of structural parameters of the ECT sensor with optimal performance is finally determined, i. e., the height of the pole plate is 7 cm, the width of the pole plate 5 cm, the spacing between the top and bottom of the pole plate 6.5 cm, and the thickness of the shielding layer 6.5 cm. Finally, the image reconstruction is carried out using the Landweber algorithm to show that the reconstructed image can be basically reconstructed and the effect of reconstruction is verified. The results show that the reconstructed image can basically map out the distribution location of the high dielectric constant region (rice with high moisture content), but the image quality of the junction needs to be improved. The results of this study are expected to provide a theoretical basis for the development of moisture ECT imaging detection system for packaged grain.

Key words: rice moisture detection; capacitance tomography; sensor simulation; image reconstruction

据统计,我国粮食产量每年稳定在6.6亿吨左右,年物流总量超过5.5亿吨,跨省物流超过2.5亿吨,物流效率稳步提升^[1]。包装成品粮在跨生态区、长运距流通过程中,受天气温差的影响,极易造成粮食结露、发霉,品质下降等损失^[2-3](北粮南运容易出现“外结露”、南方地区加工出的高温大米直接包装后运输容易出现“内结露”)。受成本、工况的限制,成品粮在运输途中和装卸环节质量快检技术研究存在较大难度,同时也是造成早期监测粮食品质劣变困难的原因之一^[4]。粮食水分是衡量其保质保鲜效果的一项重要指标,通常可以通过水分的变化来判断包装成品粮基本的质量安全状态。

电容层析成像(ECT)技术是低频“软场”电学层析成像技术的一种,主要通过测量区域内不同物质相对介电常数的变化差异来重构区域内的介质分布,具有成本低、时间分辨率高等特点,更适合作为包装成品粮质量安全无损检测的技术手段(包装材料、粮食、水分、空气之间的介电常数具有明显的差异)^[5-6],现已在土壤水分分布、水泥基材料水分迁移、多相流检测等应用场景开展相关研究^[7-8]。Grudzień等^[9]将ECT检测系统与光学图像技术进行对比分析,研究了筒仓卸料过程中由同心向偏心变化时流动边界位置的检测,结果表明,与光学测量相比,ECT系统将流动边界检测的测量误差降低了3%~9%。

现阶段,ECT技术在粮堆异常区域识别及粮仓水分分布监测方面开展了探索性研究,Asefi等^[10]提出了基于三维矢量电磁成像系统监测整仓粮堆局部区域劣变情况,该团队从小型模拟仓实验开始,目前已在工业规模80吨仓应用推广,可实现整仓粮堆局部高水分等异常区域在线监测。廉飞宇等^[11]、王艺锦等^[12]提出了利用甚高频

电磁波(30~300 MHz)勘察检测粮仓储存粮食的水分含量及分布的技术,利用探底雷达在粮仓外进行不间断的扫描,并调用射线追踪的方法构建粮仓层析图像重建的正问题可视化模型,其次通过建立的粮仓介电常数分层反演的迭代算法以及介电-水分模型来实现整仓储粮水分空间分布,此方法较好地解决了对粮仓内粮堆水分探测的便捷性、灵活性、低成本性等问题。

ECT成像系统中阵列电极传感器是数据采集的核心部件,包括电极板排列顺序及数目,极板高度、宽度、间距,屏蔽层厚度等结构参数的变化是影响测量空间内敏感场均匀性分布、电容值动态变化范围以及重建图像效果的重要因素^[13-14],尤其是立体式三维结构ECT传感器,影响其性能的可变因素较多,增加了后续数据分析的复杂度与稳定性,因此,阵列电极传感器仿真设计与结构参数优化一直是ECT检测领域研究的重点。目前,ECT传感器结构参数优化的研究主要按照二维和三维结构进行分析处理,二维结构传感器重点分析单个层面上阵列电极数量、尺寸、间距等布设的合理性,三维结构传感器通常具有轴对称性,可选取某个二维截面进行单平面电极结构参数优化研究^[15-16]。

综上所述,利用介电常数与水分间较显著的映射关系,通过ECT技术实现粮食水分可视化检测是可行的,但多数针对散粮粮堆进行探测,包装成品粮的研究还未见报道。基于此,本文采用COMSOL软件构建适用于包装粮实际尺寸的三维立体式ECT传感器仿真模型,以灵敏度均匀性(P)和电容值动态范围(G)为评价指标,通过设计正交试验,研究分析传感器阵列电极结构参数对其性能的影响规律,通过评价与分析确定最优结构参数,为包装成品粮水分ECT检测系统研发

提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 三维立体式 ECT 传感器仿真建模

利用 COMSOL 软件构建出三维 ECT 传感器仿真模型如图 1 所示,传感器主要由激励极板、测量管道、屏蔽层三部分构成。极板电极分 3 层排列,每层为 8 个极板,共 24 个极板。其中激励极板和屏蔽层的材料为铜,测量管道的材料为热塑料,测量管道和屏蔽层之间的填充材料为热塑料,激励时,激励极板设置为 1 V,其他极板设置为 0 V,屏蔽层接地。图 2 为在图 1 基础上进行网格结构体剖分的示意图。

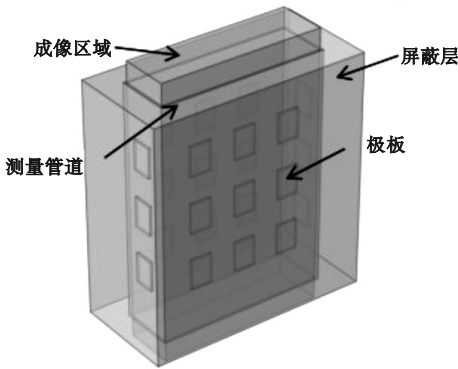


图 1 三维 ECT 传感器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 3D ECT sensor

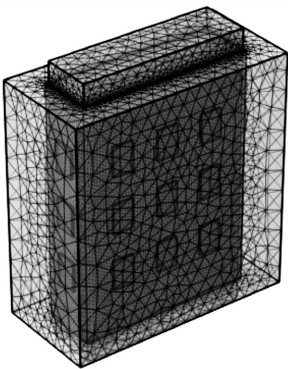


图 2 网格结构体剖分示意图

Fig. 2 Grid division structure

1.2 阵列电极结构设计

本文以实测 50 kg 大米包装尺寸为基准对各结构参数进行无量纲归一化处理,仅在立体式传感器的 XY 面进行成像分析。XY 面截面如图 3 所示,图中传感器的长 h 为 40 cm,宽 w 为 12 cm, R 为屏蔽层的厚度,即屏蔽层到传感器的距离。

图 4 为传感器侧面展开及电极标号图,其中

H 为极板高度、 W 为极板宽度、 L 为极板上下间距。在进行电容值的测量时,激励测量模式按照图的标记顺序,采用两两组合激励的方式^[17],首先选择 1-2 极板作为组合激励,依次测量 1-2 极板直到 23-24 极板间的 11 个电容值;进一步分别以 2-3 极板、3-4 极板、...、12-13 极板为组合激励,按标记顺序依次测量剩余极板间的电容数据,以此类推,全部完成 12 组组合激励极板电容值测量(由于立体式传感器的阵列电极排列为轴对称,只需进行 1 至 12 组完整的两两组合激励即可,确保测量电容值不重复),共测得 132 个独立的电容值。

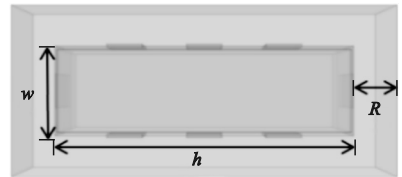


图 3 XY 面截面图

Fig. 3 XY sectional view

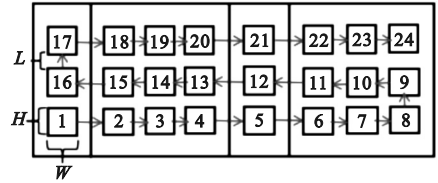


图 4 传感器侧面展开图及电极标号

Fig. 4 Side unfolded view of sensor and electrode numbering

1.3 ECT 正问题求解

三维立体式 ECT 传感器正问题求解是指已知三维空间场域内介质的介电常数分布及边界条件,求取场域内电势分布,进而求取阵列极板中不同极板之间的电容值。通常利用有限元方法将场域剖分为若干个微小单元,进一步计算敏感场矩阵,其中场域内灵敏度的计算表达式为^[18-19]

$$S_{ij}(x,y,z) = \int_v \frac{E_i(x,y,z)}{U_i} \cdot \frac{E_j(x,y,z)}{U_j} dv \quad (1)$$

式中: $S_{ij}(x,y,z)$ 是 (x,y,z) 点处的灵敏度; $E_i(x,y,z)$ 和 $E_j(x,y,z)$ 分别为第 i 个极板和第 j 个极板激励电压为 U_i 和 U_j 时 (x,y,z) 点处的电场强度; v 为微小单元 $e(x,y,z)$ 的体积域。

1.4 图像重构算法

本研究采用 Landweber 算法^[16]进行图像重构与传感器性能验证。Landweber 算法也是正则化算法的一种,在实现 ECT 图像重建时将逆问题转化为寻找最优解的优化问题,核心公式如(2)~

(4)所示。

$$\min_G \{f(x)\} \quad f(x) = \frac{1}{2} \| \mathbf{S}\mathbf{G} - \mathbf{C} \|^2 \quad (2)$$

$$\begin{cases} \mathbf{G}_0 = \mathbf{S}^T \mathbf{C} \\ \mathbf{G}_{k+1} = \mathbf{G}_k - \lambda \nabla f(\mathbf{G}_k) = \mathbf{G}_k - \lambda \mathbf{S}^T (\mathbf{S}\mathbf{G}_k - \mathbf{C}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\| \mathbf{S}\mathbf{G}_k - \mathbf{C} \| \leq \varepsilon \quad (4)$$

式中: \mathbf{G} 为归一化的介电常数; \mathbf{G}_k 表示 k 次迭代获取的介电常数分布; k 表示迭代次数; \mathbf{S} 表示敏感场矩阵; \mathbf{C} 表示归一化电容向量; λ 表示迭代步长; ε 代表设置的迭代停止阈值。

1.5 评价指标

1.5.1 XY面灵敏度均匀性

根据立体式ECT传感器电极板对称分布的原理,仅考虑1-2组合极板到12-13组合极板激励下的敏感场情况,共132个独立的敏感场分布。当被测区域被网格划分后,共有 n 个微元的灵敏度值 $S_{i,j}^{\text{avg}}$ 和标准偏差 $S_{i,j}^{\text{dev}}$,计算表达式如式(5)~(7)所示^[20],其中 P 值表示测量空间的灵敏度分布均匀性, P 值越小,灵敏度分布越均匀。

$$S_{i,j}^{\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{e=1}^n S_{i,j}(x,y,z) \quad (5)$$

$$S_{i,j}^{\text{dev}} = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{e=1}^n [S_{i,j}(x,y,z) - S_{i,j}^{\text{avg}}]^2 \right\}^{1/2} \quad (6)$$

$$P = \frac{1}{132} \left(\sum_{i=1}^{131} \sum_{j=2}^{132} \left| \frac{S_{i,j}^{\text{dev}}}{S_{i,j}^{\text{avg}}} \right| \right) \quad (7)$$

1.5.2 电容值的动态范围

本文在空场时测量电容值的动态范围 G ,计算表达式为

$$G = \frac{C_{\text{max}}}{C_{\text{min}}} \quad (8)$$

式中: C_{max} 为空场时测得的最大电容值; C_{min} 为空场时测得的最小电容值。电容值的动态范围不宜过大,并且越小越好。

1.5.3 相对图像误差

重建图像相对误差计算表达式为

$$R_{\text{image}} = \frac{\| \hat{\mathbf{g}} - \mathbf{g} \|}{\| \mathbf{g} \|} \quad (9)$$

式中: $\hat{\mathbf{g}}$ 表示重建之后的介质分布; \mathbf{g} 表示真实的介质分布。图像误差越小,重建的图像越精确。

2 结果与讨论

2.1 敏感场分析

立体式ECT传感器的电极板成轴对称排列,

1-3、1-5和1-7极板间的归一化敏感场分布如图5所示。由图可知,敏感场分布呈现为靠近电极板位置电势较高、敏感度强,远离电极板区域电势较低、敏感度变弱的特点,该结果符合ECT的“软场”效应^[21]。归一化处理后使得被测区域的敏感场分布更加均匀集中,提高了被测中心区域的灵敏度,提升了介质图像重构质量。

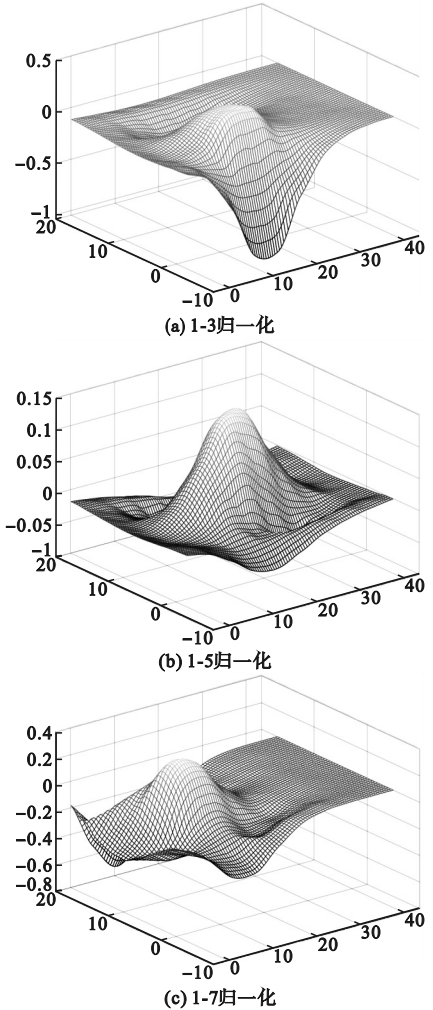


图5 ECT传感器极板间的归一化敏感场分布图
Fig.5 Normalized sensitivity field distribution between ECT sensor plates

2.2 阵列电极结构参数及其影响

将屏蔽层厚度 R 、极板高度 H 、极板宽度 W 、极板上下间距 L 作为传感器性能的影响因素,各个因素对传感器的XY面灵敏度均匀性 P 和电容值动态范围 G 的响应变化分析如下。

2.2.1 屏蔽层厚度 R

图6为不同 R 值对 P 值和 G 值的影响变化曲线。由图6可知;随着 R 的增加, P 呈现先增大后减小再增大的趋势,在 $R=6.5$ 时 P 最优; G 呈现出随着 R 的增加逐渐减小的趋势。

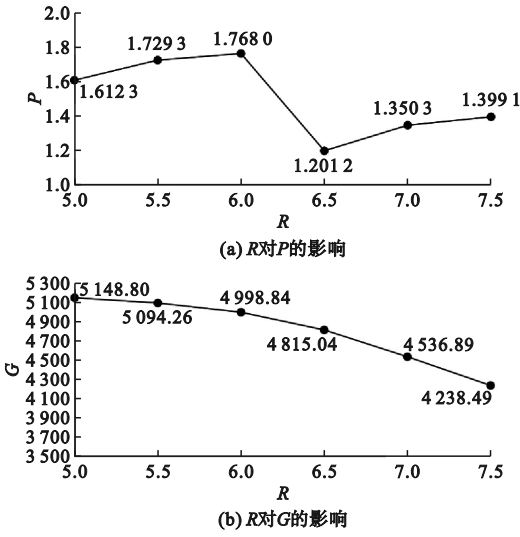


图6 R对P值和G值的影响

Fig. 6 The influence of shielding layer R on P-value and G-value

2.2.2 极板高度 H

图7为不同H值对P值和G值的影响变化曲线。由图7可知,随着H的增加,P呈现逐渐增大趋势,G呈现逐渐减小趋势。

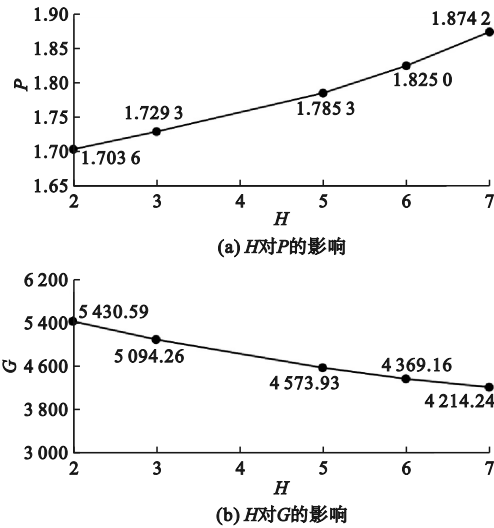


图7 H对P值和G值的影响

Fig. 7 The influence of H on P-value and G-value

2.2.3 极板宽度 W

图8为W值对P值和G值的影响变化曲线。由图8可知,随着W的增加,P和G均呈现出逐渐增大趋势。

2.2.4 极板上下间距 L

图9为L值对P值和G值的影响变化曲线。由图9可知,随着L的增加,P呈现逐渐增大趋势,G呈现逐渐减小的趋势。

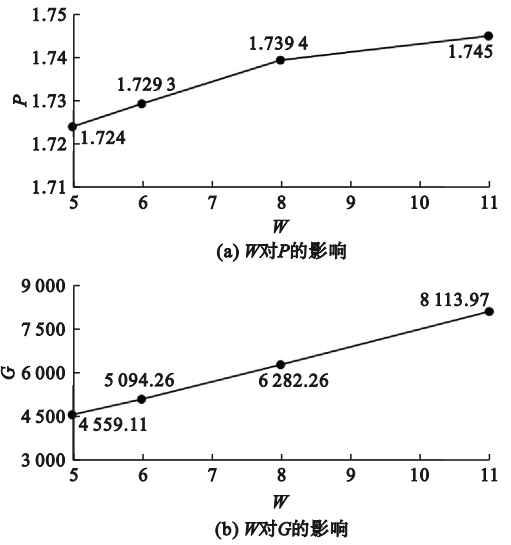


图8 W对P值和G值的影响

Fig. 8 Influence of W on P-value and G-value

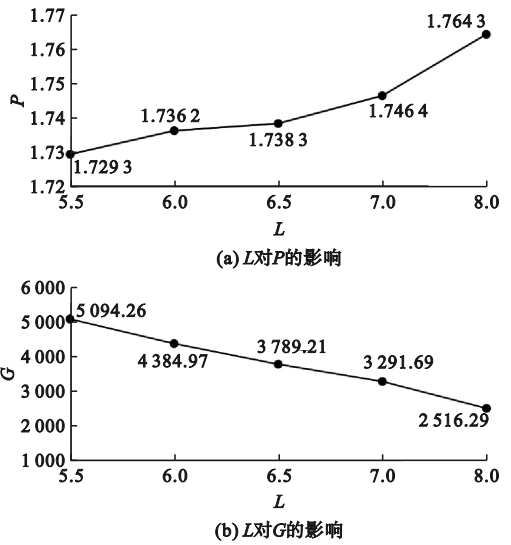


图9 L对P值和G值的影响

Fig. 9 The influence of L on P-value and G-value

2.3 正交试验分析

2.3.1 试验设计

由以上分析可知,传感器屏蔽层厚度R、极板高度H、极板宽度W、极板上下间距L都对其性能具有不同程度的影响,且无法简单量化排序,因此,立体式ECT传感器仿真设计是一个多影响因素筛选寻优问题,可通过设计正交试验对各个结构参数进行综合优选,得出最佳的传感器结构参数。本研究设计了4因素3水平的正交试验,如表1所示,两项评价指标P值和G值的计算结果如表2所示。在此基础上进一步通过极差值的计算对比分析各因素对传感器性能影响的重要程度,结果如表3和表4所示。其中,n1、n2、n3分别

为按表 1 中对应水平指标的平均值,极差为 n_1 、 n_2 、 n_3 中最大值和最小值之差,可用于评价影响因素的重要程度,极差值越大对实验结果影响越大。由于正交试验具有均匀分散性和可比性,不仅保证了实验结果的可靠性和准确性,也提高了实验效率^[19-20]。

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Level table of orthogonal experiment factors

水平	R	H	W	L
1	6.0	3	5	5.5
2	6.5	5	6	6.0
3	7.0	7	8	6.5

表 2 正交试验表

Table 2 Orthogonal experiment table

编号	R/cm	H/cm	W/cm	L/cm	P	G
1	6.0	3	5	5.5	1.794 5	4 771.098 2
2	6.0	5	8	6.0	1.919 0	4 967.502 5
3	6.0	7	6	6.5	2.094 9	3 642.819 5
4	6.5	3	8	6.5	1.339 2	4 547.228 4
5	6.5	5	6	5.5	1.448 0	4 518.389 1
6	6.5	7	5	6.0	1.873 6	3 250.619 9
7	7.0	3	6	6.0	1.467 7	3 919.704 7
8	7.0	5	5	6.5	1.775 8	2 864.124 2
9	7.0	7	8	5.5	2.859 1	5 501.709 0

表 3 各因素对 P 值的影响

Table 3 Effects of various factors on P-value

参量	R/cm	H/cm	W/cm	L/cm
n_1	1.967 2	1.438 0	2.440 3	1.736 3
n_2	1.405 1	2.321 4	1.567 7	2.343 2
n_3	2.397 2	2.010 1	1.761 5	1.690 0
极差	0.992 2	0.883 3	0.872 6	0.653 1

由表 3 可知,四个因素对 P 值的影响程度排序为 $R > H > W > L$ 。

表 4 各因素对 G 值的影响

Table 4 The influence of various factors on G value

参量	R/cm	H/cm	W/cm	L/cm
n_1	4 460.473 4	4 412.677 1	3 628.614 1	4 930.398 8
n_2	4 105.412 5	4 116.671 9	4 026.971 1	4 045.942 4
n_3	4 095.179 3	4 131.716 1	5 005.480 0	3 684.724 0
极差	365.294 1	296.005 2	1 376.865 9	1 245.674 7

由表 4 可知,四个因素对 G 值影响程度排序为 $W > L > R > H$ 。

2.3.2 重构图像相对误差评价

传感器性能参数优化的目的之一是提升待测区域内目标介质分布图像的重构精度,利用相对误差 R_{image} 作为重构图像相对误差评价指标和优化依据,沿用表 2 正交试验数据,采用 Land-

weber 算法对图 10 中四种代表性流型位置分布进行图像重建^[22-23],分别计算四种流型重建图像的误差总和 R_{sum} ,利用 R_{sum} 作为评价指标,结果如表 5 和表 6 所示。

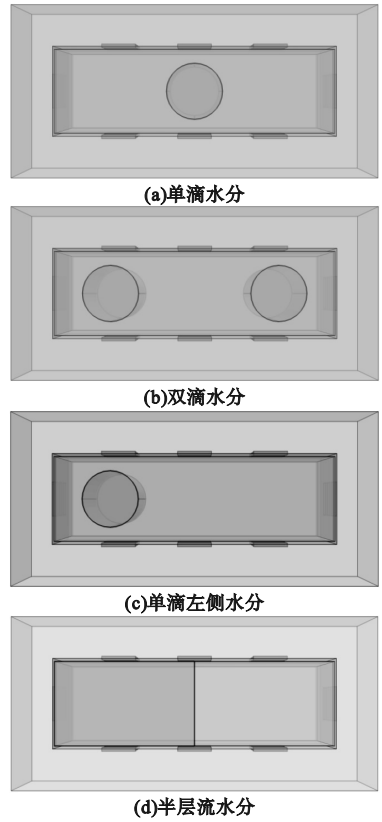


图 10 单滴水、双滴水、单滴左侧水、半层流水位置分布模型

Fig. 10 Single drop water, double drop water, single drop left water, half laminar flow water position distribution model

表 5 图像误差表

Table 5 Image error table

编号	R/cm	H/cm	W/cm	L/cm	R_{sum}
1	6.0	3	5	5.5	1.979 8
2	6.0	5	8	6.0	1.926 5
3	6.0	7	6	6.5	1.728 1
4	6.5	3	8	6.5	1.980 3
5	6.5	5	6	5.5	1.933 1
6	6.5	7	5	6.0	1.786 5
7	7.0	3	6	6.0	1.984 2
8	7.0	5	5	6.5	1.935 5
9	7.0	7	8	5.5	1.760 3

表 6 各因素对 R_{sum} 值的影响

Table 6 Effects of various factors on R_{sum} value

参量	R/cm	H/cm	W/cm	L/cm
n_1	1.878 1	1.981 4	1.900 6	1.891 1
n_2	1.900 0	1.931 7	1.881 8	1.899 1
n_3	1.893 3	1.758 3	1.889 0	1.881 3
极差	0.021 8	0.223 1	0.018 8	0.017 8

由表5和表6可知,四个因素对图像重建图像 R_{sum} 值的影响程度排序为 $H > R > W > L$ 。

利用正交试验结合 P 、 G 、 R_{sum} 三项评价指标的分析结果可知,传感器不同结构因素对三项评价指标的影响程度存在一定差异,结论如下:优先考虑图像重建的 R_{sum} , H 为其影响最大因素,选取图像重建中 R_{sum} 最小时的水平3(H 为7 cm); R 对 P 值的影响最大,选取 R 最小(R 为6.5 cm)时的水平2(屏蔽层长52 cm,宽24 cm,高56 cm); W 对 G 值的影响最大,选取 W 最小(W 为5 cm)时的水平1;由于 L 影响程度弱于其它三个因素,选择水平3(L 为6.5 cm)。综上确定一组最优的立体式传感器参数: R 为6.5 cm、 H 为7 cm、 W 为5 cm、 L 为6.5 cm。

2.3.3 优化效果检验

利用分析确定的最优传感器结构参数重新建立 ECT 传感器仿真模型,通过评价指标检验优化效果。采用 Landweber 算法进行图像重建,参数设置如表7所示,通过 COMSOL 仿真计算出上述优化参数下 XY 面的 P 值为 1.414 2, G 为 3 124.772 9, R_{sum} 为 1.677 5。对比表2和表5的评价结果分析可知,评价指标 G 值和 R_{sum} 均小于其它9组组合参数的计算结果, P 值仅高于其中1组的计算结果。因此,本研究得出的最优结构参数可使 ECT 传感器整体的综合性能得到提升。

表7 Landweber 算法参数设置

Table 7 Landweber parameter settings

编号	流型	迭代步长	迭代次数
1	单滴	0.04	5
2	双滴	0.07	9
3	单滴左侧	0.04	5
4	半层流	0.08	9

重建后的图像结果如图11~14所示,浅色代表高介电物质分布位置(大米水分分布),深色代表空间等低介电分布。由图可知,空气与介质间的整体分布位置可以重现,但介质与空气的交界处及边缘区域清晰度较差,没有更加接近圆形介质分布,这可能与立体式传感器电场分布的均匀性及待测介质场效应的覆盖范围相关,同时与图像重构算法的适宜性也有一定相关性,分析结果可为立体式 ECT 传感器结构与优化提供研究思路。

图11展示了图像重建后单滴水分的分布情况。通过 ECT 技术,可以清晰地识别出单滴水分在检测区域内的位置。图像重建的精度较高,能够准确反

映水分的空间分布,表明 ECT 技术在检测单一目标(如单滴水分)时具有较好的分辨率和准确性。

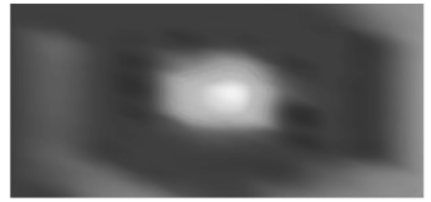


图11 图像重建后单滴水分位置分布

Fig. 11 Distribution of single droplet moisture position after image reconstruction

图12展示了图像重建后双滴水分的分布情况。与单滴水分相比,双滴水分的检测更具挑战性。图像重建结果显示,ECT 技术能够区分并定位两个独立的水分区,尽管可能存在一定的重叠或干扰,表明 ECT 技术在检测多个目标时仍具有一定的分辨能力,但可能需要进一步优化以提高精度。

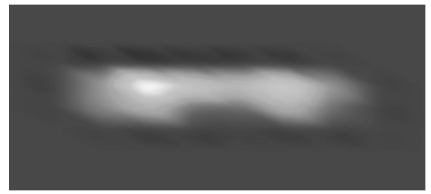


图12 图像重建后双滴水分位置分布

Fig. 12 Distribution of double droplet moisture positions after image reconstruction

图13展示了图像重建后单滴水分在左侧的分布情况。进一步验证了 ECT 技术在局部区域内的检测能力。单滴水分在左侧的分布被清晰地重建出来,表明 ECT 技术在不同区域(如左侧、右侧)的检测性能较为一致,具有较好的空间覆盖能力。

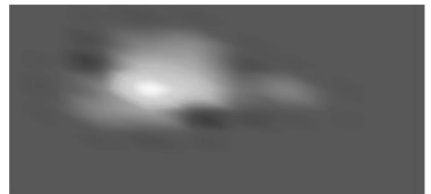


图13 图像重建后单滴左侧水分位置分布

Fig. 13 Distribution of water content on the left side of a single droplet after image reconstruction

图14展示了图像重建后半层流水分的位置分布。半层流水分分布通常涉及更复杂的水分动态变化。图像重建结果显示,ECT 技术能够捕捉到水分的流动趋势和分布特征,尽管可能存在一定的模糊或误差,表明 ECT 技术在动态水分检测中具有一定的应用潜力,但可能需要结合其他技

术或算法以提高重建精度。

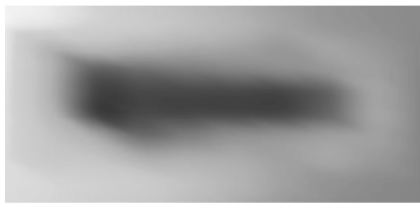


图 14 图像重建后半层流水分位置分布

Fig. 14 Distribution of water flow distribution in the second half of image reconstruction

ECT 技术在检测单滴和双滴水时表现出较高的分辨率和精度,但在处理复杂分布(如半层流)时可能存在一定的局限性;在不同区域(如左侧、右侧)的检测性能较为一致,表明其具有较好的空间覆盖能力。

3 结论

本文基于数值模拟技术,采用 COMSOL 软件构建了一套立体式 ECT 传感器仿真模型,完成了包装大米水分分布位置的检测。综合分析了传感器极板高度、宽度、上下间距、屏蔽层厚度等结构参数对测量空间的灵敏度分布均匀性、电容的动态测量范围及重构图像相对误差的影响规律,并完成了对传感器仿真模型的正问题计算。通过设计的正交试验,结合灵敏度均匀性、电容的动态范围和重构图像相对误差 3 项指标的评价分析结果,研究确立了一组性能最优的 ECT 传感器结构参数,即极板高为 7 cm、极板宽为 5 cm、极板上下间距为 6.5 cm、屏蔽层厚度为 6.5 cm。采用 Landweber 算法进行了图像重构并完成效果验证,重构图像能够基本映射出高介质物质的分布位置,交界处图像质量有待提升。研究结果可为包装大米水分分布 ECT 传感器设计和电容层析成像检测系统研发提供参考。

参考文献 (References):

[1] 吴志华,苑浩妍. 中国粮食物流 2021 年回顾与 2022 年展望 [J]. 粮食科技与经济,2022,47(2):11-16.
WU Z H, YUAN H Y. China's grain logistics in 2021 review and in 2022 prospect [J]. Food Science and Technology and Economy, 2022, 47(2): 11-16. (in Chinese)

[2] 徐永安. 粮食仓储物流技术难题和需求调研分析 [J]. 粮油食品科技, 2024, 32(2): 194-202.
XU Y A. Research and analysis on technical difficulties and requirements of grain storage and logistics [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(2): 194-202. (in Chinese)

[3] 徐永安. 粮食仓储物流技术领域发展中存在的问题与技术途径(一) [J]. 粮油食品科技, 2019, 27(1): 5-13.
XU Y A. Problems and technology approaches on the development of grain storage and logistics [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2019, 27(1): 5-13. (in Chinese)

[4] 冯春,周浩,向长琼,等.“北粮南运”散粮集装箱质量安全运输优化研究 [J]. 粮食储藏, 2021, 50(2): 10-16.
FENG C, ZHOU H, XIANG C Q, et al. Research on multi-objective intermodal transportation of grain from northern China to the south considering quality changes [J]. Grain Storage, 2021, 50(2): 10-16. (in Chinese)

[5] ZHANG W B, WANG C, YANG W Q, et al. Application of electrical capacitance tomography in particulate process measurement-A review [J]. Advanced Powder Technology, 2014, 25(1): 174-188.

[6] PAN J M, YANG Z F, YAP S H K, et al. Non-destructive online seal integrity inspection utilizing autoencoder-based electrical capacitance tomography for product packaging assurance [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 33: 100919.

[7] WAJMAN R. The concept of 3D ECT system with increased border area sensitivity for crystallization processes diagnosis [J]. Sensor Review, 2021, 41(1): 35-45.

[8] KARIM N B A, BIN ISMAIL I. Soil moisture detection using electrical capacitance tomography (ECT) sensor [C]//2011 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques. Batu Ferringhi, Malaysia: IEEE, 2011: 83-88.

[9] GRUDZIEN K, CHANIECKI Z, BABOUT L. Study of granular flow in silo based on electrical capacitance tomography and optical imaging [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2018, 62: 186-195.

[10] ASEFI M, GILMORE C, JEFFREY I, et al. Detection and continuous monitoring of localised high-moisture regions in a full-scale grain storage Bin using electromagnetic imaging [J]. Biosystems Engineering, 2017, 163: 37-49.

[11] 廉飞宇,李青,秦瑶. 储粮水分含量异常区域的雷达层析成像检测 [J]. 计算机工程, 2012, 38(18): 198-202.
LIAN F Y, LI Q, QIN Y. Radar tomography detection for abnormal regions of grain storage moisture content [J]. Computer Engineering, 2012, 38(18): 198-202. (in Chinese)

[12] 王艺锦,张元,孙希林. 基于电磁波层析成像的粮仓储粮水分检测方法的研究 [J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2013, 34(3): 14-18, 74.
WANG Y J, ZHANG Y, SUN X L. Study on stored grain moisture detection in granary based on electromagnetic tomography [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 34(3): 14-18, 74. (in Chinese)

[13] VOSS A, HOSSEINI P, POUR-GHAZ M, et al. Three-dimensional electrical capacitance tomography-A tool for characterizing moisture transport properties of cement-based materials [J]. Materials & Design, 2019, 181: 107967.

[14] 张立峰,朱炎峰. 电容层析成像系统阵列电极三维优化设计 [J]. 计量学报, 2020, 41(8): 947-952.
ZHANG L F, ZHU Y F. Three-dimensional optimal design of array electrode for electrical capacitance tomography System [J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(8): 947-952. (in Chinese)

[15] YU L, ZHANG M M, YANG D, et al. Grain moisture sensing using electrical capacitance tomography [J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(2): 2038-2048.