

基于响应面法的三维 ECT 传感器的设计与优化

鲁子佳 田汉民 田学民 王宇昊

(河北工业大学电子信息工程学院 天津 300401)

摘要: 基于空间静电磁场构建了电容层析成像(ECT)密集电极阵列传感器的三维有限元模型。分析了极板轴向高度、径向夹角和层间距对传感器电容动态范围和灵敏度均匀性性能的影响并确定优化区间,以图像相对误差、图像相关系数和空间图像误差为基础确立了传感器性能优化函数,并采用响应面法(RSM)对其结构参数进行了优化。结果表明,优化后的 8×8 密集电极阵列在管道油水两相流成像中显著提升了重建效果,图像相关系数提高9.4%,图像相对误差和空间图像误差分别降低了13.4%和15.2%。此外,还分析了结构参数之间的交互作用,以确保优化结果的稳健性。总体而言优化后的密集阵列具有更高的分辨率和精度,显示出该传感器在多相流检测中的应用潜力。

关键词: 电容层析成像;响应面法;传感器结构参数;图像重建

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

RSM-based design and optimization of 3D ECT sensors

Lu Zijia Tian Hanmin Tian Xuemin Wang Yuhao

(Electronic Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: This study develops a three-dimensional finite-element model of a dense-electrode electric capacitance tomography (ECT) sensor under a quasi-static electrostatic field. How electrode-plate axial height, radial angle and interlayer spacing affect the capacitance dynamic range and the uniformity of sensitivity are investigated, and feasible design intervals are final determined. A composite performance objective function is constructed from the image relative error, image correlation coefficient and spatial image error, and the sensor geometry is optimized via response surface methodology (RSM). Results show that the optimized 8×8 dense electrode array markedly improves oil-water two-phase flow imaging: The image correlation coefficient is increased by 9.4%, and the image relative error and spatial image error are reduced by 13.4% and 15.2% respectively. Interaction effects among structural parameters are further analyzed to ensure robustness. The optimized dense array delivers higher resolution and accuracy, demonstrating strong potential of this ECT sensor for multiphase-flow measurement.

Keywords: electrical capacitance tomography; response surface method; sensor structural parameters; image reconstruction

0 引言

电容层析成像技术(electrical capacitance tomography, ECT)是一种非侵入式可视化方法,通过测量电极间的电容值并反演介电常数分布,从而获得管道或容器内多相介质的空间分布。其典型应用对象包括油、水、粉末、颗粒及聚合物等^[1-3]。一个完整的 ECT 系统主要由电容传感器、数据采集系统和图像重建计算机组成^[4],其中,传感器阵列的结构与参数对电容测量范围、灵敏度分布及最终成像质量起决定性作用^[5]。

与传统二维 ECT 传感器采用单层电极排列不同,三维

ECT 通过多层电极结构获取同层及层间电容信息,可获得介质的空间位置、形状及体积分布等三维成像结果^[6]。然而,多层电极结构显著增加了影响传感器性能的参数数量,使得优化设计更具复杂性^[7-8]。已有研究围绕三维 ECT 传感器的电极数量、排布方式及几何参数展开。例如,王世伟等^[9]分析了极板数目、极板轴向长度和管壁材料与几何尺寸对传感器灵敏度与成像效果的影响;宋春良等^[10]利用正交设计优化了双层 16 电极结构,并验证了其成像精度的提升;吴章友等^[11]通过归一化灵敏度与均匀性误差确定了 8 层 32 电极结构的最优轴径比与覆盖率;Guo 等^[8]则在 8 层 32 电极结构中提出了基于 ATV-PGD 的图像重建方

法,获得了更高质量的轴向成像。尽管如此,针对多层密集电极阵列的结构参数优化及参数间交互作用的研究仍较为有限。

与已有研究中采用的低密度电极结构以及相对较高的 8 层 32 电极结构相比,本文选择构建具有更高空间采样密度、更强层间耦合与三维信息获取能力、更少灵敏度盲区的 8 层 64 电极阵列传感器模型。以管道油水两相流检测为应用前景,系统分析了极板轴向高度、层间距和径向夹角 3 项关键结构参数对传感器性能的影响,并结合灵敏度均匀性、电容动态范围确定优化范围。进一步采用响应面法(response surface methodology, RSM)对结构参数进行多因素优化设计,并分析参数之间的交互作用,最终获得最佳参数组合。

1 三维 ECT 传感器模型建立

1.1 三维 8 层 64 电极 ECT 传感器物理模型

三维 8 层 64 电极 ECT 传感器主要由绝缘管道、电极以及屏蔽层构成。在油水两相流实验研究及工业现场应用中,小口径混输管线通常采用 50~150 mm 范围的典型结构尺度,其中 60~80 mm 尤其常见,被广泛用于实验平台、测试回路及现场校准装置^[12-13]。因此,本研究在综合考虑工业应用尺度、实验可实现性以及三维 ECT 传感器安装需求后,将管道内径选定为 70 mm。传感器整体机构如图 1 所示;其截面结构如图 2 所示;传感器的关键结构参数如表 1 所示。

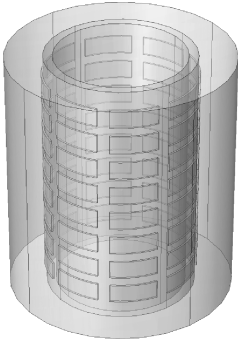


图 1 传感器的整体结构

Fig. 1 The overall structure of the sensor

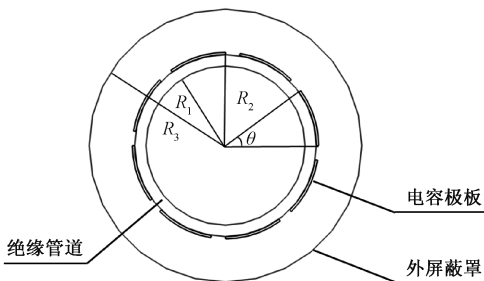


图 2 传感器截面结构

Fig. 2 Sensor cross-sectional structure

表 1 传感器关键结构参数

Table 1 Key structural parameters of sensors

名称	参数值及单位
极板个数	64
管道半径 R_1	35 mm
管道厚度 $R_2 - R_1$	5 mm
电容极板厚度	0.5 mm
极板轴向高度	10 mm
极板径向夹角	36°
极板层间距	5 mm
相对介电常数	3.4(油)、100(水)

1.2 三维 8 层 64 电极 ECT 传感器数学模型

建立 ECT 系统数学模型的目的在于明确被测区域介电常数分布与电极间电容值之间的对应关系^[14]。为此,模型通过 COMSOL 软件建立,并基于以下假设条件:敏感场可视为静电场;管道内无自由电荷。

在上述假设基础上,电势分布可由静电场理论中的泊松方程描述为:

$$\nabla \cdot [\epsilon(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z)] = 0 \quad (1)$$

其中, $\epsilon(x, y, z)$ 表示介电常数分布; $\varphi(x, y, z)$ 为电势分布。

设敏感场电场强度为 E , 则 E 与 φ 满足:

$$E(x, y, z) = -\nabla \varphi(x, y, z) \quad (2)$$

当电极 i 施加激励电压 V , 极板 j 作为检测电极时,根据高斯定理可得极板 j 的感应电荷为:

$$Q_{i,j} = \oint_{\Gamma_j} \epsilon(x, y, z) \cdot E(x, y, z) d\Gamma_j \quad (3)$$

其中, Γ_j 为包围极板 j 的闭合曲面(或曲线)。由此可得电极 i 与电极 j 之间的电容值:

$$C_{i,j} = \frac{Q_{i,j}}{V_{i,j}} \quad (4)$$

其中, $V_{i,j}$ 为电极 i 与电极 j 之间的电势差。

图像重建过程中,需要获取灵敏度分布函数,由于传统方法计算灵敏度分布函数过程复杂且计算量大,当前通常采用电势分布法^[15]求解 ECT 灵敏度分布函数:

$$S_{i,j}(x, y, z) = -\int_V \frac{E_i(x, y, z)}{U_i} \cdot \frac{E_j(x, y, z)}{U_j} dV \quad (5)$$

其中, $S_{i,j}(x, y, z)$ 表示点 (x, y, z) 处对应电极对 (i, j) 的灵敏度; $E_i(x, y, z)$ 与 $E_j(x, y, z)$ 分别为电极 i 和电极 j 施加激励电压 U_i 和 U_j 时,在点 (x, y, z) 处的电场强度; V 为被测区域的体积。

1.3 电容传感器的结构参数分析

本文对极板轴向高度、极板层间距和极板径向夹角 3 个结构参数进行分析,选取反应灵敏度分布均匀性的指标 P 、电容值动态范围指标 D 进行定量分析。

灵敏度的均匀性反映了空间分辨率在不同敏感场中的分布差异,这将直接影响重建图像质量^[16]。用 P 来表示灵敏度均匀性指标,其计算公式^[17]如下:

$$P = \frac{1}{M} \sum_{i,j} \left| \frac{S_{i,j}^{\text{dev}}}{S_{i,j}^{\text{avg}}} \right| \quad (6)$$

其中, M 为独立测量数, $S_{i,j}^{\text{avg}}$ 和 $S_{i,j}^{\text{dev}}$ 分别为电极对 (i, j) 之间的灵敏度系数矩阵的均值和标准差。求取公式为:

$$\begin{cases} S_{i,j}^{\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n S_{i,j}(k) \\ S_{i,j}^{\text{dev}} = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [S_{i,j}(k) - S_{i,j}^{\text{avg}}]^2 \right\}^{1/2} \end{cases} \quad (7)$$

其中, n 为敏感场的单元剖分数, $S_{i,j}(k)$ 为第 k 个单元的灵敏度。均匀性指标 P 值越小,表示传感器的灵敏度越均匀。

为兼顾电容测量系统的测量精度与采集可实现性,本文将电容动态范围定义为:

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

其中, $C_{\max}$ 和 $C_{\min}$ 分别为被测电容的最大值和最小值,如果 D 值过大,量程跨度过大,则会提高电容采集难度;如果 D 过小则有效电容值变化小,不利于稳定准确重建图像,故应根据实际情况适当选取 D 值的大小。

1) 极板轴向高度

图 3 所示为极板轴向高度对各相关性能指标的影响。由图 3(a)可知,电容动态范围随极板轴向高度增大而增大;当高度 > 14 mm 时,由于有效极板面积继续增大而场强随层间距增大而衰减,表现为最小电容值开始下降而最大电容值仍上升。图 3(b)中 P 值随高度上升而增大(P

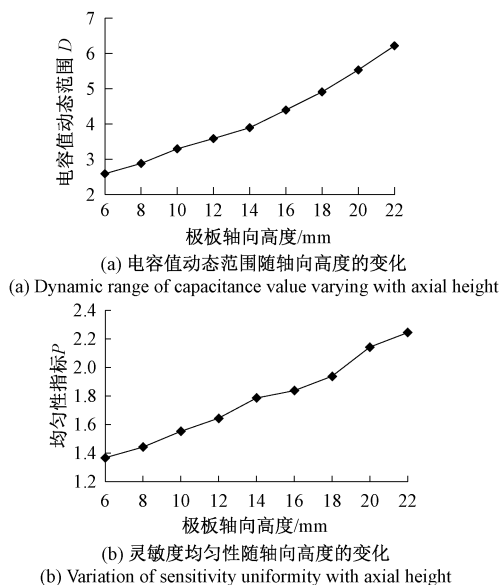


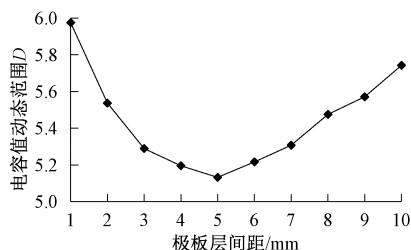
图 3 极板轴向高度对传感器性能的影响

Fig. 3 The influence of axial height of polar plates on sensor performance

越小均匀性越好),表明灵敏度均匀性下降。综上,极板轴向高度越大均匀性越差,且 14 mm 以上受场强衰减影响更显著,故将优化区间取为 6~14 mm。

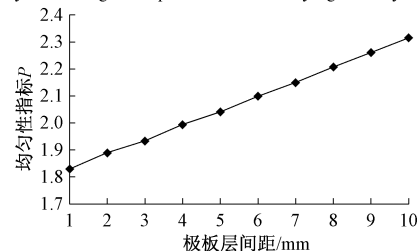
2) 极板层间距

极板层间距对各相关性能指标的影响如图 4 所示。图 4(a)中电容动态范围随层间距增大先降后升,拐点约 5 mm。其机理为间距较小时,最大电容值由层间相邻电极主导,随间距增大而下降;当间距超过 5 mm 后,最大电容值转由同层相邻电极主导而回升。最小电容值由上下层对置电极决定,随间距增大持续下降。图 4(b)表明 P 值随层间距增大而增大(均匀性变差)。综合考虑均匀性恶化及最小电容值下降对成像的不利影响,层间距优化区间取 1~7 mm。



(a) 电容值动态范围随层间距的变化

(a) Dynamic range of capacitance value varying with layer spacing



(b) 灵敏度均匀性随轴向高度的变化

(b) Variation of sensitivity uniformity with layer spacing

图 4 极板层间距对传感器性能的影响

Fig. 4 The effect of electrode layer spacing on sensor performance

3) 极板径向夹角

极板径向夹角对各相关性能指标的影响如图 5 所示。图 5(a)中电容动态范围随极板径向夹角增大而增大,并在约 38° 处增速加快。图 5(b)表明 P 值随夹角增大小幅下降,灵敏度分布略趋均匀。综合而言,增大夹角有利于提升动态范围,但超过 38° 可能受边缘效应影响,电容变化可控性降低并引入误差;且对均匀性的改善幅度有限。故取 $26^\circ \sim 38^\circ$ 作为优化区间。

2 电容传感器结构参数优化实验

2.1 RSM 实验设计

RSM 是一种采用试验设计理论对指定的设计点集合进行试验,得到目标函数和约束函数的响应面模型,来预测非试验点的响应值的方法^[18-19]。

根据 ECT 传感器结构参数与系统响应之间非线性的特点,选取二阶响应函数进行拟合,表达式为^[20]:

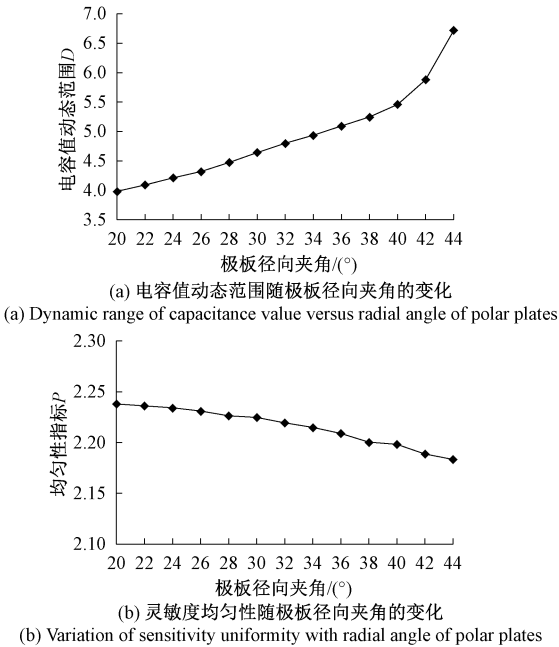


图 5 极板径向夹角对传感器性能的影响

Fig. 5 The influence of radial angle of polar plates on sensor performance

$$\tilde{y}(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (9)$$

其中, β_0 为偏移系数, β_i 为一次项系数, β_{ii} 为二次项系数, β_{ij} 为交互作用系数。

在 RSM 中的实验设计子模块,本文采用 Box-Behnken 设计(box behnken design, BBD)进行多因素实验设计。BBD 具有实验点分布均匀、设计效率高和可避免极端水平的优点,适用于非线性多因子问题的建模与优化。

本研究选择极板轴向高度 A、极板径向夹角 B、极板层间距 C 这 3 个因素作为自变量。BBD 设计中,每个因素有 3 个水平,水平从小到大分别以 -1, 0, 1 对其编码,即 -1 代表最小值,0 代表中间值,1 代表最大值。试验因素与水平设计如表 2 所示。

表 2 试验因素与水平

Table 2 Experimental factors and levels

水平	A/mm	B/(°)	C/mm
-1	6	26	1
0	10	32	4
1	14	38	7

2.2 性能优化函数

为了评估传感器图像重建质量,采用原型与重建图像相关系数(pearson correlation coefficient, CC)来度量其图像相似度,相关系数定义为^[21]:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N [(\hat{g}_i - \bar{\hat{g}})(g_i - \bar{g})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{g}_i - \bar{\hat{g}})^2 \sum_{i=1}^N (g_i - \bar{g})^2}} \quad (10)$$

其中, N 为管道内剖分单元总数, $\hat{g}$ 和 $\bar{g}$ 分别为重建图像的像素灰度值和实际值的均值。

图像相对误差(relative error, RE)是衡量重建图像与原设定图像之间介电常数数值上的误差统计指标^[22],为偏小型指标,计算公式为:

$$RE = \frac{\hat{G} - G}{G} \quad (11)$$

其中, G 和 $\hat{G}$ 分别对应的是设定模型重建图像的归一化介电常数分布。

空间图像误差(spatial image error, SIE)是描述重建图像与原设定图像之间位置、体积及形状的空间误差总和指标,为偏小型指标,计算公式为^[22]:

$$SIE = \frac{\sum_{i=1}^N |G_s(i) - G_r(i)|}{\sum_{i=1}^N G_s(i)} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (12)$$

其中, N 为剖分单元个数, $G_s(i)$ 和 $G_r(i)$ 是重建图像和设定模型的介质分布。

本文选择结合 CC、RE 与 SIE,引入乘法效用构建性能优化函数。在多指标评价与效用理论中,乘法效用模型适用于各指标相对独立且同等重要的场景,几何平均本质上对应于等权乘法效用函数,其结果能够反映各指标的“协同表现”,可避免极端值放大,并保证各指标影响的对等性。同时,几何平均可自然融合“相关性高、误差低”这类方向相反的指标,使综合评价更为稳健合理^[23]。由于相关系数为偏大项,两类误差为偏小项,将误差转化为“越大越好”的效用,权值均取 1,性能优化函数定义为:

$$J = \sqrt[3]{(CC(1 - RE)(1 - SIE))} \quad (13)$$

因此, J 越大表示整体性能越优,优化任务转化为求 J 的最大值。

在油水两相流系统中,水相相对介电常数显著高于油相,可作为成像对比的主导介质。为避免评价结果对单一流型过度敏感,本文选取 3 种典型的水相分布形态进行仿真,如图 6 所示,分别计算性能优化函数 J ,将 3 种流型的

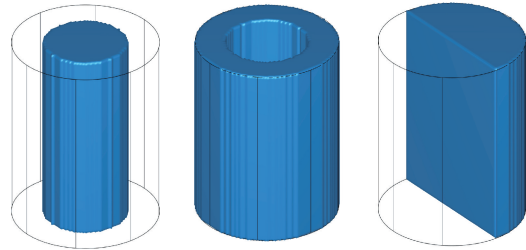


图 6 典型流型

Fig. 6 Typical flow pattern

J 值取算术平均,得到综合响应 $\bar{J} = (J_1 + J_2 + J_3)/3$, 并以此作为响应面分析中的单一响应量用于结构优化。该处理在不同流型之间提供了更稳健的一致性度量。

2.3 实验结果分析

运用 Design Expert 实验设计优化软件,建立 BBD 实验设计表,再通过仿真计算和数据处理可以得到优化目标响应值,最后结合 RSM 对参数进行综合考虑并优化。RSM 结果如表 3 所示。

表 3 仿真实验结果
Table 3 Simulation experiment results

编号	A/mm	B/(°)	C/mm	$\bar{J}$
1	1	10	26	0.453 4
2	7	10	26	0.429 2
3	1	10	38	0.451 1
4	7	10	38	0.378 4
5	1	6	32	0.431 4
6	7	6	32	0.472 8
7	1	14	32	0.432 7
8	7	14	32	0.201 1
9	4	6	26	0.491 1
10	4	6	38	0.478 2
11	4	14	26	0.352 7
12	4	14	38	0.305 4
13	4	10	32	0.521 9
14	4	10	32	0.521 9
15	4	10	32	0.521 9

通过回归分析和对各因素进行拟合,构建二次多项式方程:

$$\bar{J} = 0.521\,9 - 0.035\,887\,5 \cdot A - 0.014\,162\,5 \cdot B - 0.072\,7 \cdot C - 0.012\,125 \cdot AB - 0.068\,25 \cdot AC - 0.008\,6 \cdot BC - 0.058\,112\,5 \cdot A^2 - 0.035\,762\,5 \cdot B^2 - 0.079\,287\,5 \cdot C^2 \quad (14)$$

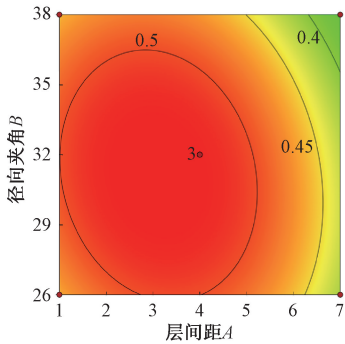
在得到回归方程后,对其进行方差分析可得,拟合模型对 J 的模型显著性检验 P 值为 0.000 2,说明该模型具有良好的精度。相关系数 $R^2 = 0.988\,2$,修正系数 $R^2_{\text{adj}} = 0.967\,1$,预测系数 $R^2_{\text{pre}} = 0.811\,9$,与前两个相差不大,表明预测值与实测值符合良好,模型有代表性。

通过实验数据以及分析方程建立响应曲面,分析不同因子之间的交互作用, J 响应面模型如图 7 所示。

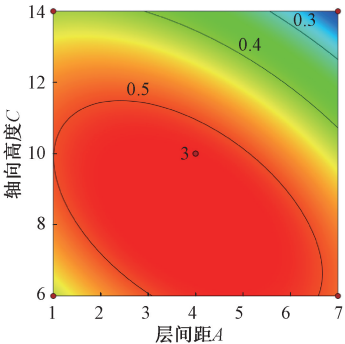
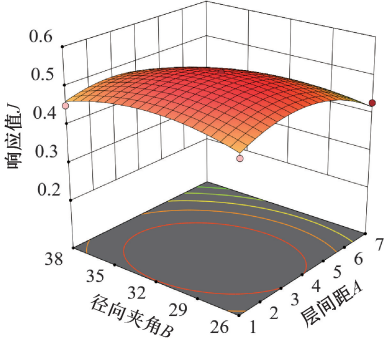
可根据响应面趋势的陡峭程度来判断各因素间的交互作用。由图 7 可知,响应面的曲面均为凸面,开口向下,表明响应值有极大值。 AB 的响应面曲面较为平缓,等高线图形形状偏圆且间距较大,说明两因素间交互作用不显著; AC 响应面曲面较为陡峭,变化趋势明显,且等高线图形形状类似椭圆形,表示因素间存在极显著的交互作用; BC 的响应面曲面较为平缓,等高线图形形状偏圆且间距较大,说明两因素间交互作用不显著。

通过 Design Expert 对响应曲面寻优,选取 J 响应值最大值,根据回归模型预测的最优参数为:极板层间距 3.88 mm,极板径向夹角 31.16°,极板轴向高度 8.26 mm。

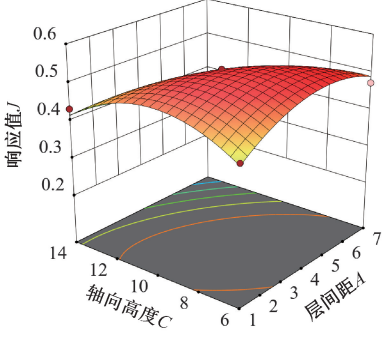
为实际工程需要,选择参数为:极板层间距 4 mm,极



(a) 因子 A、B 交互作用图
(a) Interaction diagram of factors A and B



(b) 因子 A、C 交互作用图
(b) Interaction diagram of factors A and C



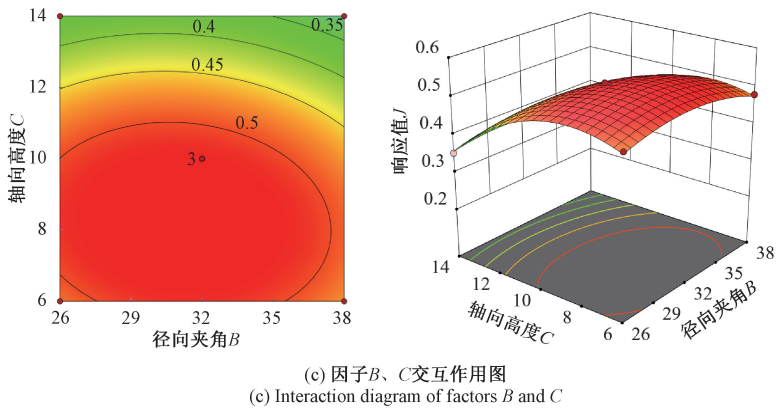


图 7 J 响应面图
Fig. 7 Response surface diagram of J

板径向夹角 31° ,极板轴向高度 8 mm。

2.4 条件优化与验证试验结果

基于选定的优化结果,在仿真条件下,对 3 种常见流型进行图像重建,对每种流型分别计算 CC、RE 和 SIE,据此得到各流型的单项评价结果。进一步,对每一项评价指标在 3 种流型上的结果取算术平均,得到统一的综合衡量量 $\overline{CC}$ 、 $\overline{RE}$ 、 $\overline{SIE}$,以这 3 项均值作为最终的图像重建性能评价指标如表 4 所示。分析表 4 可知,优化后重建图像的各项指标均朝有利方向变化。CC 提高 9.4%;RE 降低 13.4%;SIE 降低 15.2%。这些结果表明,所提出的结构优化显著增强了重建图像与参考分布的一致性,同时有效降低了整体误差与空间分布误差,其中 SIE 的改善最为显著,说明空间失真得到显著抑制,整体成像质量与稳定性均获得提升。

表 4 优化前后图像评价指标

Table 4 Image evaluation metrics before and after optimization

优化状态	$\overline{CC}$	$\overline{RE}$	$\overline{SIE}$
优化前	0.764	0.510	0.298
优化后	0.858	0.376	0.146

分析优化前后重建图像评价指标可知,优化后的传感器图像重建误差更低,分辨率更高图像重建精度得到的显著提升。

此外,为验证结构密度提升带来的潜在优势,本文对比了相同极板覆盖条件下的 8 层 32 电极模型。结果表明,在典型油水分布场景中,32 电极阵列 CC 指标普遍低于 64 电极阵列约 15%~20%,RE 与 SIE 则分别高出 20%~40%。该差异主要源于电极密度不足导致的敏感场覆盖不均,从侧面印证了密集电极结构在三维成像中的必要性。

3 结 论

ECT 传感器三维结构参数对其空间的灵敏度分布均匀性、电容动态范围及重建图像质量具有显著影响。本文采用 RSM 对密集电极阵列 ECT 传感器的 3 个主要参数进行了优化设计。结论如下:

建立了 ECT 传感器的三维物理模型。通过对比 P 、 D 的变化,分析了极板轴向高度、极板层间距和极板径向夹角对传感器性能的影响并确定了优化范围。通过 RSM 建立结构参数与评价指标之间的数学关系,并确定了最佳优化方案。对优化后的传感器进行图像重建,对比优化前后的图像重建效果与重建图像评价指标,证明优化后的传感器有着更高的图像重建精度,图像重建效果更好。

参考文献

[1] 郭志恒,任嘉铭. 一种新型应用于平面电容层析成像系统的电容阵列传感器设计[J]. 电子测量与仪器学报,2024, 38(6): 195-203.
Guo Zhiheng, Ren Jiaming. Design of a novel capacitive array sensor for planar electrical capacitance tomography system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(6): 195-203.

[2] 曹蕊,田汉民,田学民,等. 基于二级控制 64 极板平面阵列传感器的 ECT 系统[J]. 电子测量技术,2025, 48(4): 101-107.
Cao Rui, Tian Hanmin, Tian Xuemin, et al. ECT system based on two-stage control 64-plate planar array sensor[J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(4): 101-107.

[3] 王文涛,张鹏,高凯凯,等. 电容层析成像技术及其在水泥基材料领域的应用[J]. 硅酸盐通报,2020, 39(7): 2042-2051.
Wang Wentao, Zhang Peng, Gao Kaikai, et al. Electrical capacitance tomography and its application in cement-based materials[J]. Bulletin of Silicate, 2020, 39(7): 2042-2051.

[4] 马敏,范广永,王涛. 基于 ECT 的传感器系统的优化

- 设计[J]. 仪表技术与传感器, 2019(8): 87-91.
- Ma Min, Fan Guangyong, Wang Tao. Optimal design of a sensor system based on ECT[J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(8): 87-91.
- [5] 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 Lifeng, Zhu Yanfeng. Three-dimensional optimal design of array electrodes in an electrical capacitance tomography system[J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(8): 947-952.
- [6] Mao M X, Ye J M, Wang H G, et al. Investigation of gas-solids flow in a circulating fluidized bed using 3D electrical capacitance tomography [J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(9): 095401.
- [7] Fabijanska A, Banasiak R. Graph convolutional networks for enhanced resolution 3D electrical capacitance tomography image reconstruction [J]. Applied Soft Computing, 2021, 110: 107608.
- [8] Guo A F, Yang D Y, Zhang S X. Structure optimization of 3D ECT sensor with a high height-to-diameter ratio [J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 25(4): 6511-6521.
- [9] 王世伟, 王超, 郭琪, 等. 用于超音速分离流场参数测量的 ECT 图像重建算法优化[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(9): 111-119.
- Wang Shiwei, Wang Chao, Guo Qi, et al. Optimization of ECT image reconstruction algorithm for parameter measurement in supersonic separated flow field [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(9): 111-119.
- [10] 宋春良, 孙启国, 常宗奎. 油气润滑三维结构 ECT 传感器电容极板优化设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(2): 314-320.
- Song Chunliang, Sun Qiguo, Chang Zongkui. Optimal design of capacitor plates for a 3D ECT sensor in oil-gas lubrication [J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(2): 314-320.
- [11] 吴章友, 杨道业, 卞启涛, 等. 三维电容层析成像传感器优化及循环流化床提升管轴向流动成像[J]. 化工进展, 2021, 40(12): 6532-6539.
- Wu Zhangyou, Yang Daoye, Bian Qitao, et al. Optimization of 3D electrical capacitance tomography sensor and axial flow imaging in a circulating fluidized bed riser [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(12): 6532-6539.
- [12] Wang Y, Sun S J, Lu X P, et al. Optimization of 3D sensor design for electrical capacitance tomography[C]// 2022 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference(I2MTC), 2022: 1-6.
- [13] 许闻楷, 陈德运, 高明, 等. 电容层析成像三维传感器结构设计及图像重建[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(5): 34-39.
- Xu Wenkai, Chen Deyun, Gao Ming, et al. Structural design and image reconstruction of 3D electrical capacitance tomography sensor[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2016, 21(5): 34-39.
- [14] Guo Z H, Ren J M. Three-dimensional electrical capacitance tomography based on a novel planar array capacitance sensor [J]. Electronics Letters, 2025, 61(1): e70340.
- [15] Zhao Q, Li J, Liu S, et al. The sensitivity optimization guided imaging method for electrical capacitance tomography [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-15.
- [16] Cui Z Q, Yang C Y, Sun B Y, et al. Liquid film thickness estimation using electrical capacitance tomography[J]. Measurement Science Review, 2014, 14(1): 8.
- [17] Zulkiflli N A, Shanhrulnizahani M D, Hor X F, et al. Electrical capacitance tomography(ECT) electrode size simulation study for cultured cell [C]//Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2071(1): 012052.
- [18] 姜衡, 管贻生, 邱志成, 等. 基于响应面法的立式加工中心动静态多目标优化[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 125-133.
- Jiang Heng, Guan Yisheng, Qiu Zhicheng, et al. Multi-objective dynamic and static optimization of vertical machining center based on response surface methodology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(11): 125-133.
- [19] Guerra J, Velasquez L, Rubio-Clemente A, et al. Design and optimization of a siphon turbine using the response surface methodology [J]. Results in Engineering, 2024, 22: 102241.
- [20] Diharjo K, Gapsaro F, Andoko A, et al. Optimization of nano cellulose extraction from timoho fiber using response surface methodology (RSM) [J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2024, 14 (20): 25557-25567.
- [21] Liu X, Wang X X, Hu H L, et al. An extreme learning machine combined with Landweber iteration algorithm for the inverse problem of electrical capacitance tomography[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2015, 45: 348-356.
- [22] Abdelatty M, Incandela J, Hu K P, et al. Microscale 3D capacitance tomography with a CMOS sensor array[C]// 2023 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference(BioCAS), 2023: 1-5.
- [23] Mariani F, Ciommi M. Aggregating composite indicators through the geometric mean: A penalization approach[J]. Computation, 2022, 10(4): 64.

作者简介

鲁子佳, 硕士研究生, 主要研究方向为电容层析成像。

E-mail: 740051641@qq.com

田汉民(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为无损检测、电容层析成像、图像处理等。

E-mail: 642154752@qq.com