

基于响应面法的油气润滑 ECT 传感器优化设计

孙启国, 孙 奥, 李照威

(北方工业大学 机械与材料工程学院, 北京 100144)

摘要: 建立了油气润滑 ECT 传感器的基准三维物理模型; 分析了管道厚度、电容极板长度、轴向屏蔽电极长度和径向屏蔽电极深度 4 个结构参数对传感器性能的影响并确定优化范围; 通过灵敏度影响系数和电容响应比确立了传感器性能优化函数; 采用响应面法对上述 4 个结构参数进行了优化设计; 在此基础上以图像相对误差和图像相关系数为评价标准, 对优化后传感器的重建图像质量进行了评判; 研究结果表明, 优化传感器得到的图像质量最高, 图像相对误差平均降低了 22.99%, 图像相关系数平均提高了 21.73%。

关键词: 油气润滑; 电容层析成像; 响应面法; 图像重建

Optimal Design of Oil-air Lubricated ECT Sensor Based on Response Surface Method

SUN Qiguo, SUN Ao, LI Zhaowei

(Mechanical and Materials Engineering College, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: the reference 3D physical model of the oil-air lubricated ECT sensor is established; The influences of four structural parameters, namely the thickness of the pipeline, the length of the capacitive electrode, the length of the axial shielded electrode and the depth of the radial shielded electrode, on the performance of the sensor are analyzed and their optimization ranges are determined. The sensor performance optimization function is established by sensitivity influence coefficient and capacitance response ratio. The response surface method is used to optimize the design of the above four structural parameters. On this basis, through the relative error of image and the image correlation coefficient, the quality of the reconstructed image of the optimized sensor is evaluated to verify its reliability. The research results show that the image quality obtained by the optimized sensor is the highest, the relative error of image is decreased by 22.99% on average, and the image correlation coefficient is increased by 21.73% on average.

Keywords: oil-air lubrication; electrical capacitance tomography (ECT); response surface method; image reconstruction

0 引言

电容层析成像技术 (ECT, electrical capacitance tomography) 是一种工业过程层析成像技术。ECT 系统主要由电容传感器、数据采集装置和计算机构成, 其工作原理是被测物体具有不同的介电常数从而导致电容发生变化, 其特点是价格低廉, 非侵入式, 响应速度快, 成像过程无干扰^[1-2]。目前, 此技术被广泛应用于在多相流识别。

ECT 传感器的结构将直接影响测量电容的采集和灵敏度的分布, 进而影响重建图像的质量。目前, 针对大管径 (直径 20 mm 以上) 的结构参数优化问题进行了较为广泛地研究。如文献 [3] 推导了电容敏感阵列电极的数学模型, 根据灵敏度场确定优化指标, 分析了结构参数对优化指标影响, 并获得了一组结构优化参数。结果表明结构优化参数可靠, 电容阵列敏感电极分辨率提高了 10%。文献 [4] 设计了一种具有 8 个电极的 ECT 传感器, 根据敏感场的均

匀程度对传感器的参数进行选取, 采用正交设计法对参数进行计算及优化, 得到一组优化参数, 结果表明优化后电容传感器可以获得较为理想成像结果。文献 [5] 建立了 12 电极的矩形 ECT 传感器, 通过有限元法计算了电容极板和屏蔽极板长度对灵敏度分布的影响, 提出了最佳电容极板长度应该与传感器的宽度或直径相同。文献 [6] 为研究管内为油水两相流设计了 12 电极的 ECT 传感器, 根据灵敏度的均值和标准差确立了评价函数, 改变单一结构参数对电容值重新计算, 并结合正交实验法对 4 个参数进行优化。文献 [7] 采用遗传算法与响应面法结合的优化方法对电容传感器的相关结构进行优化, 结果表明该方法有效, 可以获得更佳的灵敏度分布。文献 [8] 根据仿真得到电容极板间敏感场的分布情况, 基于 PSO 与混沌搜索策略理论提出了一种改进算法, 以敏感场中的灵敏度大小为目标, 并结合上述算法对 ECT 传感器结构进行优化, 结果得到一组最优结构。文献 [9] 设计了一种三维结构的 ECT 传感器, 研

收稿日期:2021-03-03; 修回日期:2021-05-06。

基金项目:北京市属高等学校人才强教深化计划项(PHR201107109)。

作者简介:孙启国(1963-),男,山东烟台人,博士,教授,主要从事摩擦学与工业润滑技术、机械系统动力学及其控制方向的研究。

通讯作者:孙 奥(1995-),男,河北唐山人,硕士研究生,主要从事油气润滑技术,电容层析成像方向的研究。

引用格式:孙启国,孙 奥,李照威.基于响应面法的油气润滑 ECT 传感器优化设计[J].计算机测量与控制,2021,29(11):250-255.

究了电容极板长度对灵敏度和图像重建的影响, 提出了一个优化的三维 ECT 传感器设计, 即电容极板的长宽比为 0.75。文献 [10] 分别以均匀性指标和图像误差为目标对传感器结构进行分析, 提出一种模糊综合指标作为优化目标, 并结合正交法进行优化设计, 结果表明优化后的传感器可以同时获得更好的灵敏度分布和图像重建结果。然而, 目前对于油气润滑小管径 (直径 10 mm 以下) 有关结构参数优化的研究较少。

油气润滑 ECT 传感器尺寸较小, 它对测量电容值、灵敏度场和重建图像质量的影响更加突出。本团队曾对油气润滑 ECT 传感器的二维结构的主要参数进行过优化设计, 但考虑的优化参数较少, 并且没有考虑其三维结构参数导致的特定影响。例如在小管径下, 径向场效应更加明显, 管道电容和边缘电容不可忽略, 这都导致传感器的灵敏度分布不均, 测量电容值不准确, 图像处理病态严重^[11]。

针对以上问题, 本文在二维结构参数的基础上, 建立了 UMIST 型油气润滑 ECT 传感器的基准三维物理模型; 分析了管道厚度、电容极板长度、轴向屏蔽电极长度和径向屏蔽电极深度 4 个结构参数对传感器性能的影响并确定优化范围; 通过灵敏度影响系数和电容响应比确立了传感器性能优化函数; 采用响应面法对上述 4 个结构参数进行了优化设计。最后以图像相对误差和图像相关系数为评价标准, 对优化后传感器的重建图像质量进行评判以验证其可靠性。

1 油气润滑 ECT 传感器模型建立与结构参数分析

ECT 传感器结构变化会影响正问题中的测量电容值和灵敏度场分布, 进而影响反问题中的流型识别和图像重建质量。本文首先以 UMIST 型的 ECT 传感器作为基准传感器, 并计算测量电容值, 然后在基准传感器上改变单个结构参数值, 重新计算测量电容值, 最后通过比较满场/空场电容差的大小来判断传感器性能变化, 从而确定结构参数的优化范围。

1.1 物理模型建立

ECT 传感器通常采用低频激励, 即小于 1 MHz, 其内部可视为静电场。在油气管道中只考虑环状流, 建立基准传感器。基准传感器从外到内的构成为外屏蔽罩、轴向屏蔽电极、电容极板、径向屏蔽电极、管道, 如图 1 所示。图 2 给出了其径向管道二维视图, 图中极板张角为 θ , 径向电极

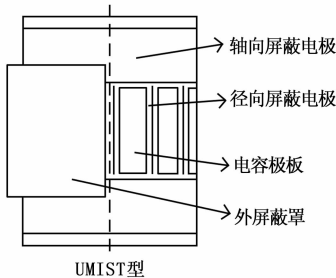


图 1 基准传感器的结构图

插入深度为 h_1 , 管道圆心到管道半径距离为 R_1 , 管道圆心到管道外径距离为 R_2 , 管道圆心到外屏蔽罩距离为 R_3 , 其具体结构参数, 见表 1。

表 1 基准传感器的结构参数

编号	名称	数值及单位
1	极板个数	8 个
2	管道半径 R_1	5 mm
3	管道厚度 $R_2 - R_1$	2 mm
4	径向电极插入深度 h_1	0.8 mm
5	电极张角 θ	42°
6	铜制电容电极厚度	0.2 mm
7	轴向屏蔽电极到电容极板的距离	0.2 mm
8	铜制电容极板长度 l	10 mm
9	轴向屏蔽极板长度 l_a	5 mm
10	相对介电常数	1(空气), 2.6(油), 4(填充介质)

1.2 数学模型建立

为了求解 ECT 模型的电容值及其灵敏度, 对三维模型做以下假设: 1) 各相介质分布均匀且互不干扰; 2) 屏蔽罩隔绝外部电场; 3) 管道内无自由电荷。

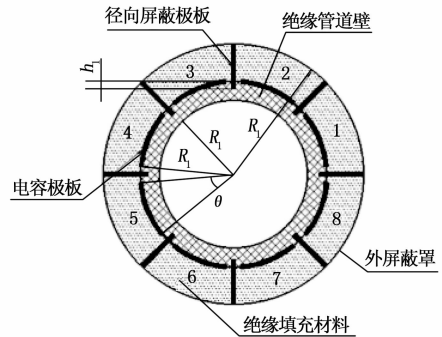


图 2 径向管道二维视图

根据以上假设, 电势分布可以用泊松方程可以表示为^[12]:

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

式中, $\nabla \cdot$ 及 ∇ 分别为散度及梯度算子, $\epsilon(x, y, z)$ 相对介电常数分布, $\varphi(x, y, z)$ 为三维电势分布。

以 8 电极传感器为研究对象, 若激励电容极板为 i , 狄里赫利边界条件为:

$$\varphi(x, y, z) = \begin{cases} V((x, y, z) \in \Gamma_i) \\ 0((x, y, z) \in \Gamma_k \text{ or } (x, y, z) \in \Gamma_s) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $k = 1, 2, \dots, 8$ 且 $k \neq i$, V 为极板激励电压, Γ_i 为激励极板表面, Γ_k 为检测极板表面, Γ_s 为径向屏蔽极板和屏蔽罩表面。

对一端的电容极板 i 施加电压 V , 另外一段的电容极板 j 由于电势差就会产生相应的电荷, 根据高斯定理可得极板 j 的电荷量, 则 i, j 俩极板之间的电容可以表示为:

$$c_{i,j} = \frac{Q(\Gamma_j)}{V} = -\frac{1}{V} \int_{\Gamma_j} \epsilon(x, y, z) \nabla \varphi^{(i)}(x, y, z) \cdot d\Gamma_j \quad (3)$$

式中, $Q(\Gamma_j)$ 为电极 j 上的感应电荷量, Γ_j 为在极板 j 周围的封闭区域。

在第 i 和第 j 电容极板间的灵敏度可以表示为:

$$S_{ij}(x, y, z) = - \int_{\rho(x, y, z)} \frac{E_i(x, y, z)}{V} \cdot \frac{E_j(x, y, z)}{V} dx dy dz \quad (4)$$

式中, $\rho(x, y, z)$ 为 (x, y, z) 的体坐标点; $E_i(x, y, z), E_j(x, y, z)$ 为 i 极板激励, j 极板接地时, 在 (x, y, z) 处的电场强度。

1.3 结构参数分析

本文对管道厚度, 电容极板长度, 轴向屏蔽电极长度, 径向屏蔽电极深度 4 个结构参数进行分析。由于油气润滑 ECT 传感器的对称性, 只求解电容极板 1 与电容极板 2、3、4、5 间的测量电容及电容变化量。改变结构参数的测量电容值如表 2 所示, 其中满场为管道内全为润滑油, 空场为管道内全为空气。由表 2 数据可以看出, 当 ECT 传感器的结构发生改变, 电容极板间的测量电容值也会发生变化。

表 2 改变结构参数的测量电容值

电容类型	结构参数/mm	C_{12} /pF	C_{13} /pF	C_{14} /pF	C_{15} /pF
满场测量 电容值	基准传感器	34.42	6.52	3.39	2.81
	$R_2 - R_1 = 1$ mm	26.20	5.73	3.00	2.50
	$R_2 - R_1 = 3$ mm	38.85	6.97	3.58	2.96
	$l = 7.5$ mm	23.67	4.25	2.18	1.80
	$l = 12.5$ mm	45.22	8.88	4.68	3.90
	$l = 15$ mm	55.98	11.27	6.00	5.00
	$l_a = 7.5$ mm	34.07	6.39	3.29	2.72
	$l_a = 10$ mm	33.73	6.33	3.26	2.69
	$h_1 = 0$ mm	274.99	17.99	8.70	7.12
	$h_1 = 0.4$ mm	66.51	10.39	5.26	4.34
$h_1 = 1$ mm	24.95	4.71	1.67	0.76	
空场测量 电容值	基准传感器	31.54	3.25	1.43	1.16
	$R_2 - R_1 = 1$ mm	23.66	2.43	1.29	1.08
	$R_2 - R_1 = 3$ mm	36.61	4.00	1.58	1.25
	$l = 7.5$ mm	21.97	2.14	0.92	0.74
	$l = 12.5$ mm	41.08	4.39	1.97	1.60
	$l = 15$ mm	50.53	5.54	2.51	2.05
	$l_a = 7.5$ mm	31.26	3.20	1.40	1.13
	$l_a = 10$ mm	30.92	3.18	1.39	1.12
	$h_1 = 0$ mm	274.62	10.43	3.80	2.97
	$h_1 = 0.4$ mm	65.38	5.59	2.26	1.80
$h_1 = 1$ mm	21.62	2.33	0.71	0.30	
满场/空场 电容差值	基准传感器	2.88	3.27	1.96	1.65
	$R_2 - R_1 = 1$ mm	2.54	3.3	1.71	1.42
	$R_2 - R_1 = 3$ mm	2.24	2.97	2	1.71
	$l = 7.5$ mm	1.7	2.11	1.26	1.06
	$l = 12.5$ mm	4.14	4.49	2.71	2.3
	$l = 15$ mm	5.45	5.73	3.49	2.95
	$l_a = 7.5$ mm	2.81	3.19	1.89	1.59
	$l_a = 10$ mm	2.81	3.15	1.87	1.57
	$h_1 = 0$ mm	0.37	7.56	4.9	4.15
	$h_1 = 0.4$ mm	1.13	4.8	3	2.54
$h_1 = 1$ mm	3.33	2.38	0.96	0.46	

满场测量电容值与空场测量电容值的差值反映了传感器对管内整体单元的敏感程度, 其差值越大, 说明传感器对管道内多相流变化越敏感, 性能越好^[13]。因此, 本文用满场/空场电容差值来评价传感器性能。

各结构参数分析如下。

1) 管道厚度 $R_2 - R_1$: 管道厚度越大, 满场和空场的测量电容值越大, 数据采集越容易, 但由于油气润滑系统的管道较小, 管道电容对测量电容有一定影响, 即减低测量电容值的准确性, 减低管道厚度可以减小管道电容对测量电容的影响, 即提高测量电容值的准确性, 故管道厚度的优化范围不宜太大。从表 2 可以看出, 随着管道厚度不断增加, 满场/空场电容差值中的 C_{12}, C_{13} 不断减小, C_{14}, C_{15} 不断增加, 可见满场/空场电容差值整体变化并不明显。综合考虑油气润滑管道厚度的优化范围在 $R_2 - R_1 \in [1, 3]$ 比较合理。

2) 电容极板长度 l : 电容极板越长, 其有效面积增加, 管内所包含的介质越多, 测量的电容值越大, 但会出现三维弱化现象, 不能很好地反应管道内多相流的分布。电容极板越短, 其有效面积减少, 虽然能很好的反应管内不同相的分布, 但测量电容变得较小, 这增加了数据采集的难度。由表 2 可以看出, 电容极板长度越长, 满场/空场电容差值越大, 但增加的趋势不明显。故电容极板长度的优化范围为 $l \in [10, 15]$ 。

3) 轴向屏蔽电极长度 l_a : 油气润滑系统中, 边缘电容影响系数超过 0.5, 即轴向的边缘电容也会影响测量电容值^[14]。轴向屏蔽电极不但可以消除边缘电容, 提高测量电容的准确性, 而且可以提高传感器管道内部灵敏度场的均匀性。由表 2 可以看出, 轴向屏蔽电极长度对满场/空场电容差值影响不大, 故轴向屏蔽电极长度优化范围为 $l_a \in [5, 10]$ 。

4) 径向屏蔽电极深度 h_1 : 径向屏蔽电极主要作用于相邻电容极板对之间, 它可以阻断相邻电容极板间的电场线, 使相邻电容极板对间的测量电容降低。由于非相邻电容极板对间的电场线主要经过管道空间, 所以径向屏蔽电极对其影响不大。由表 2 可以看出, 随着径向屏蔽电极深度的增加, 相邻电容极板对的满场/空场电容差值不断增加, 但非相邻电容极板对的满场/空场电容差值不断降低, 综合加工工艺问题, 故径向屏蔽电极深度的优化范围为 $h_1 \in (0, 1]$ 。

2 油气润滑 ECT 传感器优化实验

2.1 优化函数的确定

油气润滑 ECT 传感器中, 由于“软场效应”导致管道内部的灵敏度分布不均匀, 即管道外侧靠近电容极板的位置传感器的灵敏度高, 而在管道中心传感器的灵敏度相对较低, 进而导致重建图像的质量不佳^[15]。因此, 优化传感器的一个重要指标是让其管道内部具有均匀相等的灵敏度。

油气润滑 ECT 传感器具有 8 个电极, 由于对称性, 典型的灵敏度场只有 4 个, 即 1-2, 1-3, 1-4, 1-5。本文定义灵敏度影响系数 P :

$$P = \frac{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=2}^5 |P_{i,j}|}{4} \quad (5)$$

$$P_{i,j} = \frac{S_{i,j}^{dev}}{S_{i,j}^{avg}} (i = 1, j = 2, 3, 4, 5) \quad (6)$$

$$S_{i,j}^{avg} = \frac{1}{t} \sum_{e=1}^t S_{i,j}(n) \quad (7)$$

$$S_{i,j}^{dev} = \left(\frac{1}{t} \sum_{e=1}^t (S_{i,j}(n) - S_{i,j}^{avg})^2 \right)^{1/2} \quad (8)$$

式中, t 为有限元划分的单元个数; $S_{i,j}(n)$ 为在第 n 单元的灵敏度值; $S_{i,j}^{avg}$ 表示平均灵敏度值, 其值越高越好; $S_{i,j}^{dev}$ 表示每个灵敏度值相对平均灵敏度值的偏差程度, 其值越小越好。

P 值越小, 表示油气润滑 ECT 传感器中的灵敏度场分布越均匀。

在油气润滑 ECT 传感器中, 测量电容值的准确性是影响图像重建质量的另一重要指标。在管道内为环状流的情况下, 相邻电容极板对间的测量电容值最大, 表示为:

$$C_{max} = C_{1,2}^m \quad (9)$$

相对电容极板对间的测量电容值最小, 表示为:

$$C_{min} = C_{1,5}^m \quad (10)$$

本文定义电容响应比, 表示为:

$$C_r = \frac{C_{max}}{C_{min}} \quad (11)$$

电容响应比 C_r 值越小, 说明传感器所需的量程范围低, 测量的电容值越准确。

综上所述, 油气润滑 ECT 传感器的优化设计需要同时考虑灵敏度和测量电容值这两个方面的指标。因此, 本文定义油气润滑 ECT 传感器的性能优化函数, 权值系数都为 1, 结合公式 (5) 和 (11) 表示为:

$$y_{sof} = P + C_r \quad (12)$$

可见, 综合优化函数 y_{sof} 值越小, 油气润滑 ECT 传感器的性能越好。因此, 本文将优化问题转化为求 y_{sof} 的最小值。灵敏度和测量电容值是通过有限元仿真计算得到的, 与传感器的结构参数并无明显的数学表达式, 因此需要采用一定的优化理论建立数学关系。

2.2 响应面法实验设计

响应面法 (RSM, response surface method) 综合了数学建模和实验设计, 首先通过对少量且具有代表性的样本点进行实验, 然后回归拟合并建立所需因素和结果的函数关系, 最后根据实验者的需要取得所需因素的最优水平值。近年来成为发展最快的优化理论方法, 多用于医学制药, 环境工程, 机械工程等领域中各种因素的优化设计^[16]。

响应面法的基本方法是运用线性或者多次方程来拟合未知复杂的函数。它与正交实验相比, 正交实验不能在选取区域内获得样本点的最优组合, 从而无法得到响应目标

的最优解。而且当有较多实验因素时, 正交实验次数会极大增加, 增加工作量。响应面法的优势明显, 例如拟合精度高, 实验次数和周期短, 预测效果好等^[17]。

一般情况下系统响应 Y 与影响因素 x 之间关系可以表示为^[18]:

$$Y = \tilde{y}(x) + \delta \quad (13)$$

式中, $\tilde{y}(x)$ 为拟合的近似函数, $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 为 n 维需要的影响因素, δ 为实验误差。

实验值与响应值通过响应面法拟合的目标函数可以表达为:

$$\tilde{y}(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \varphi_i(x) \quad (14)$$

式中, β_0 为偏移系数, β_i 为待定系数, $\varphi_i(x)$ 为基函数, k 为基函数的个数。

在能满足目标函数的要求下, 设计的响应面函数要尽量简单。本文优化参数较多为非线性问题, 因此采用二阶响应函数, 表达式为:

$$\tilde{y}(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (15)$$

式中, β_i 为一次项系数, β_{ii} 为二次项系数, β_{ij} 为交互项系数。

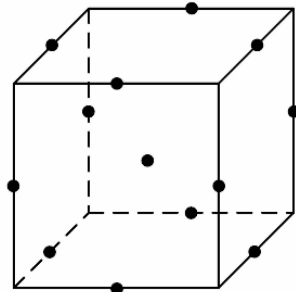


图 3 BBD 实验点分布

本文影响因素为 4 个, 因此采用 Box Behnken Design (BBD) 方法确定油气润滑 ECT 传感器的设计优化方案。BBD 实验点分布如图 3 所示。BBD 设计法中每个影响因素有 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, 代表最大值。各个影响因素水平值和编码值如表 3 所示。

表 3 影响因素的水平值和编码值

影响因素	变量	水平		
		-1	0	1
管道厚度 $R_2 - R_1$ / mm	X_1	1	2	3
电容极板长度 l / mm	X_2	10	12.5	15
轴向屏蔽电极长度 l_a / mm	X_3	5	7.5	10
径向屏蔽电极深度 h_1 / mm	X_4	0	0.5	1

2.3 实验结果分析

根据表 3 可自动生成结构参数组合, 再通过仿真计算和数据处理可以得到性能优化函数值 (y_{sof}), 最后结合响

应面实验对 4 个参数进行综合考虑并优化。响应面实验具体数据如表 4 所示。

表 4 响应面实验具体数据

试验序号	$R_2 - R_1 / \text{mm}$	l / mm	l_a / mm	h_1 / mm	y_{SOF}
1	1	10	7.5	0.5	28.434 2
2	3	10	7.5	0.5	40.105 3
3	1	15	7.5	0.5	26.583 5
4	3	15	7.5	0.5	36.214 0
5	2	12.5	5	0	87.864 5
6	2	12.5	10	0	91.984 5
7	2	12.5	5	1	27.378 6
8	2	12.5	10	1	27.504 9
9	1	12.5	7.5	0	88.652 6
10	3	12.5	7.5	0	85.870 8
11	1	12.5	7.5	1	39.162 6
12	3	12.5	7.5	1	31.227 1
13	2	10	5	0.5	36.845 5
14	2	15	5	0.5	33.877 8
15	2	10	10	0.5	37.558 1
16	2	15	10	0.5	34.073 8
17	1	12.5	5	0.5	27.337 4
18	3	12.5	5	0.5	36.693 1
19	1	12.5	10	0.5	27.202 8
20	3	12.5	10	0.5	38.144 6
21	2	10	7.5	0	98.498 2
22	2	15	7.5	0	86.716 4
23	2	10	7.5	1	28.901 0
24	2	15	7.5	1	27.058 3
25	2	12.5	7.5	0.5	35.440 0

拟合出来的回归方程需要进行误差分析，以判读回归方程的拟合程度。残差概率分布几乎在一条直线上，说明回归方程拟合效果好^[19]。残差概率分布如图 4 所示。

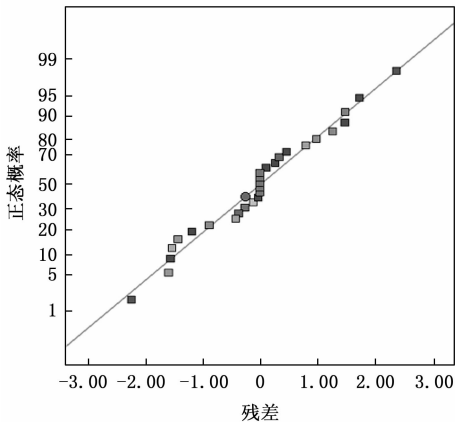


图 4 残差概率分布

由图 4 可知，本次拟合的回归方程精度高，适应性较好，可以对油气润滑 ECT 传感器的影响参数进行优化预测。根据预测功能选取 y_{SOF} 值最小的一组参数组合。优化参

数组合如表 5 所示。

表 5 优化参数组合

管道厚度 $R_2 - R_1 / \text{mm}$	电容极板 长度 l / mm	轴向屏蔽电 极长度 l_a / mm	径向屏蔽电 极深度 h_1 / mm
1.7	13.7	6.2	0.7

3 油气润滑 ECT 传感器优化结构验证

本文采用 LBP 和 Tikhonov 正则化算法对基准传感器和优化后的传感器进行图像重建，并通过图像相对误差 (IME, the relative error of image) 和图像相关系数 (CORR, the image correlation coefficient) 来比较图像质量。

IME 和 CORR 表达式分别如下^[20-21]：

$$IME = \frac{\|\hat{G} - G\|}{G} \quad (16)$$

$$CORR = \frac{\sum_{i=1}^m (\hat{G}_i - \bar{\hat{G}})(G_i - \bar{G})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (\hat{G}_i - \bar{\hat{G}})^2 \sum_{i=1}^m (G_i - \bar{G})^2}} \quad (17)$$

式中， G 为真实图像值， \hat{G} 为图像重建值， \bar{G} 和 $\bar{\hat{G}}$ 分别为 G 和 \hat{G} 的平均值， m 为像素点个数。

本文对管内所有像素点进行计算。图像相对误差 (IME) 反应了重建图像与真实图像误差大小，其值越小越好。图像相关系数 (CORR) 反应了重建图像与真实图像的相关程度，其值越大越好。IME 和 CORR 值如表 6 所示。

表 6 IME 和 CORR 值

算法	评价标准	基准传感器	优化传感器
LBP	IME	0.686 7	0.477 8
	CORR	0.643 5	0.875 4
Tikhonov 正则化	IME	0.577 9	0.327 0
	CORR	0.777 7	0.980 4

由表 6 可以看出，基准传感器的图像相对误差平均为 0.632 3，优化传感器的图像相对误差平均为 0.402 4，相比基准传感器的图像相对误差平均降低了 22.99%；基准传感器的图像相关系数平均为 0.710 6，优化传感器的图像相关系数平均为 0.927 9，相比基准传感器的图像相关系数平均提高了 21.73%。可见，采用优化传感器得到的重建图像质量更高。

4 结束语

针对油气润滑 ECT 传感器的测量电容值不准确，灵敏度不均匀，图像重建质量低等问题，采用响应面法对其主要三维参数进行优化设计。结论如下：

1) 建立了油气润滑 ECT 传感器的基准三维物理模型。通过对比满场/空场电容差的大小，分析了管道厚度、电容极板长度、轴向屏蔽电极长度和径向屏蔽电极深度 4 个结

构参数对传感器性能的影响并确定了优化范围。

2) 通过灵敏度影响系数和电容响应比确立了传感器性能优化函数, 采用响应面法建立了上述 4 个结构参数和传感器性能优化函数的数学关系, 并进行优化设计确定最佳优化方案。

3) 采用 LBP 和 Tikhonov 正则化算法对优化后的传感器进行图像重建, 其图像质量明显提高, 图像相对误差平均降低了 22.99%, 图像相关系数平均提高了 21.73%。

参考文献:

[1] 赵进创, 叶晨光, 何宇瑞, 等. 嵌入式电容层析成像系统软件平台的构建 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (9): 2289 - 2291.

[2] LOSER T, WAJMAN R, MEWES D. Electrical capacitance tomography: image reconstruction along electrical field lines [J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12 (8): 1083 - 1091.

[3] 王化祥, 张立峰, 朱学明. 电容层析成像系统阵列电极的优化设计 [J]. 天津大学学报, 2003 (3): 307 - 310.

[4] 于晓洋, 徐巧玉, 施楚, 等. 电容层析成像系统中电容传感器参数优化设计 [J]. 测试技术学报, 2004 (3): 196 - 199.

[5] PENG L, MOU C, YAO D, et al. Determination of the optimal axial length of the electrode in an electrical capacitance tomography sensor [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2005, 16 (2): 169 - 175.

[6] 陈德运, 李谋遵, 郑贵滨. 电容层析成像传感器有限元分析及参数优化 [J]. 电子器件, 2006 (2): 427 - 430.

[7] BRANDISKY K, SANKOWSKI D, BANASIAK R, et al. ECT sensor optimization based on RSM and GA [J]. Compel International Journal for Computation & Mathematics in Electrical & Electronic Engineering, 2012, 31 (31): 858 - 869.

[8] 李岩, 朱艳丹, 袁小花, 等. 基于 ANSYS 电容层析成像结构参数分析与优化 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2012, 17 (1): 54 - 57.

[9] LI Y, HOLLAND D J. Optimizing the geometry of three-dimensional electrical capacitance tomography sensors [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62 (1): 244 - 250. (上接第 244 页)

[9] 黄任宏, 李程程. 灰色系统理论在工程实践中应用研究 [J]. 科学技术创新, 2019, 13: 4 - 6.

[10] 刘思峰, 杨英杰, 吴利丰, 等. 灰色系统理论及其应用 (第七版) [M]. 北京: 科学出版社, 2014.

[11] 周文浩, 曾波. 灰色关联度模型研究综述 [J]. 统计与决策, 2020, 15 (555): 29 - 34.

[12] 徐齐利. TOPSIS 综合评价系统设计与实现 [J]. 信息与管理研究, 2020, 6 (5): 70 - 80.

[13] 徐玖平, 吴巍. 多属性决策的理论与方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 73 - 79.

[14] 刘凌刚, 耿俊豹, 魏曙寰, 等. 基于灰色关联 TOPSIS 法的舰船装备维修方案决策 [J]. 火力与指挥控制, 2018 (5):

Sensors Journal, 2014, 15 (3): 1567 - 1574.

[10] LI N, CAO M C, HE C F, et al. Multi-parametric indicator design for ECT sensor optimization used in oil transmission [J]. IEEE Sensor Journal, 2017, 17 (7): 2074 - 2088.

[11] 孙启国, 闫晓丹, 孙奥. 油气润滑 ECT 系统图像重建中病态问题分析 [J]. 润滑与密封, 2020, 45 (3): 121 - 125.

[12] YE Z, BANASIAK R, SOLEIMANI M. Planar array 3D electrical capacitance tomography [J]. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2013, 55 (12): 675 - 680.

[13] YANG W Q. Design of electrical capacitance tomography sensors [J]. Measurement Science & Technology, 2010, 21 (4): 447 - 453.

[14] 孙启国, 黄博凯, 杜超. 油气润滑 ECT 传感器的建模与边缘电容分析 [J]. 润滑与密封, 2017, 42 (12): 39 - 44.

[15] 王莉莉, 陈德运, 于晓洋, 等. 电容层析成像系统传感器优化设计 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36 (3): 515 - 522.

[16] 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.

[17] REN W X, CHEN H B. Finite element model updating in structural dynamics by using the response surface method [J]. Engineering Structures, 2010, 32 (8): 2455 - 2465.

[18] 李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用 [J]. 实验室研究与探索, 2015, 34 (8): 41 - 45.

[19] GRADY H, KENNETH L. Application of factorial and response surface methodology in modern experimental design and optimization [J]. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2006, 36 (3-4): 141 - 151.

[20] LI Y, CAO S, MAN Z Q, et al. Image reconstruction algorithm for electrical capacitance tomography [J]. Information Technology Journal, 2011, 10 (8): 269 - 291.

[21] XIAO L, WANG X, HU H, 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 (5): 348 - 356.

[15] 周华任, 张晟, 穆松, 等. 综合评价方法及其军事应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2015: 5 - 8.

[16] 谢军, 张建军, 王刚. 北斗卫星导航系统测量误差指标体系 [J]. 宇航学报, 2018, 39 (9): 976 - 984.

[17] 彭张林, 张爱萍, 王素凤. 综合评价指标体系的设计原则与构建流程 [J]. 科研管理, 2017, 4 (38): 209 - 215.

[18] 张建立. 飞行器测控设备综合管理系统设计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.

[19] 任云良. 基于 1 - 9 标度法的交互性资产绩效管理评价体系 [J]. 实验技术与管理, 2017, 11 (34): 259 - 262.

[20] 陈正伟. 综合评价技术及应用 [M]. 成都: 西南财经大学出版社, 2013: 35 - 37.