

油气润滑三维结构 ECT 传感器 电容极板优化设计

宋春良, 孙启国, 常宗奎

(北方工业大学 机械与材料工程学院, 北京 100144)

摘要: 针对小管径油气润滑 ECT 系统中传感器存在的重建图像轴向分辨率过低、采集信号微弱等问题, 建立了该系统 ECT 电容传感器的三维结构优化模型, 确定了电容极板间隔、单层电容极板长度和电容极板厚度 3 个重要结构参数的初值范围, 采用正交实验的方法对传感器电容极板结构参数进行了优化; 研究结果表明, 优化后的传感器图像精度系数提高了 131.20%。

关键词: 油气润滑; 三维 ECT; 电容极板结构参数; 优化设计; 图像精度

Optimal Design of Capacitor Plate of Oil—air Lubricated Three—dimensional ECT Sensor

SONG Chunliang, SUN Qiguo, CHANG Zongkui

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

Abstract: Aiming at the problems in the small diameter oil—air lubrication ECT system, the sensor reconstruction image is low axial resolution, and the acquisition signal is weak, the three—dimensional structure optimization model for the ECT capacitive sensor is established. The initial values of the spacing of capacitor plate, the length of single—layer capacitor plate and the thickness of capacitor plate are determined. Three important structural parameters is optimized by the orthogonal experiment method. The research results show that the image accuracy coefficient of the optimized sensor is increased by 131.20%.

Keywords: oil—air lubrication; three—dimensional ECT; capacitance plate structure parameters; optimized design; image accuracy

0 引言

油气润滑 ECT 技术应用于二维结构的电容传感器, 其信号采集微弱、轴向分辨率较低^[1-2], 且有易受噪声影响, 信噪比低等问题^[3]。因此, 三维结构

ECT 传感器的优化设计近些年倍受关注, 如不同平面的电极数^[4-5]、电极的角度分布^[6]、电极长度^[7]、电极排列方式^[8]等。目前关于大管径的传感器电容极板优化, 国内外学者已做了大量的研究^[9-10]。

油气润滑 ECT 中的油管直径一般在 10 mm 左

收稿日期:2021-08-15; 修回日期:2021-09-12。

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:宋春良(1995-),男,安徽濉溪人,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。

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。

引用格式: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.

右^[11], 然而对于小管径的电容极板的研究, 目前相关的文献报道极少。

若三维结构油气润滑 ECT 传感器电极层设计较多, 则测量周期过长, 不满足实时性; 若设计较少, 则不能很好反映传感器管道内介质轴向分布状态^[7]。

针对以上问题, 本文基于小管径油气润滑 ECT 背景, 对小管径的 ECT 三维结构电容极板进行了定量分析。本文设计的三维结构传感器由 16 个电极组成, 分为 2 层布置在绝缘管道外壁, 每层 8 个极板。

1 ECT 系统模型的建立与评价函数的确定

1.1 三维 16 极板传感器的物理模型的建立

考虑油气润滑 ECT 传感器小管径的特征, 建立了 16 电极电容传感器的三维物理模型, 见图 1。传感器相关结构参数如表 1 所示。ECT 传感器截面图如图 2 所示^[12]。传感器电极标号如图 3 所示。



图 1 ECT 电容传感器 3D 物理模型

表 1 电容传感器的结构参数

名称	数值
极板数目 N /个	16
管道内径 R_1 /mm	10
径向电极插入厚度 h_1 /mm	1
铜制极板厚度/mm	0.2
管道外径 R_2 /mm	14
电极张角 θ /($^\circ$)	42
保护极板长度/mm	10
保护极板间距/mm	0.03
介电常数 ϵ_r (空气)	1
介电常数 ϵ_r (油)	2.6
介电常数 ϵ_r (填充介质)	4

1.2 三维 16 极板传感器的数学模型的建立

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。

根据以上假设, 电势分布可以用泊松方程可以表示为^[13]:

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

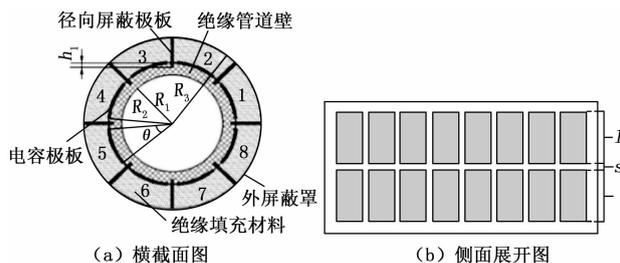


图 2 ECT 三维传感器结构图

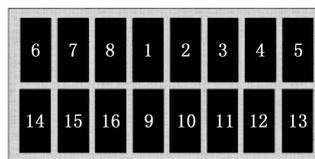


图 3 传感器电极标号

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

以 16 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, $k=1, 2, \dots, 16$ 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 为屏蔽罩和径向屏蔽极板表面。

对一端的电容极板 i 施加电压 V , 另外一端的电容极板 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 两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。

本文定义图像精度系数 IAC (image accuracy coefficient), 其数学表达式为:

$$IAC = \frac{CORR}{IME} \quad (4)$$

式中, $CORR$ 、 IME 分别是图像相关系数和图像相对误差^[8]。

传感器图像精度系数 (IAC) 同时涵盖了图像相关系数和图像相对误差的信息, 可作为传感器精度的一个

重要评价指标。其值越大，电容传感器的精度越高。

2 电容极板的结构参数分析

本文对油气润滑小管径传感器电容极板的结构参数展开了研究。因为电容传感器阵列的对称性，选取 1~9、1~10、1~11、1~12 和 1~13 的极板对的电容值进行分析，全场表示管内既有油又有空气^[14-15]。

由表 2 可知，极板间隔越小，全场测量电容值越大，数据采集越容易。较长的极板间隔会使三维弱化得到加强，管内油气介电常数分布状态不能很好体现；较小的极板间隔会使电极对的电容动态范围变大，不利于实际检测。

表 2 传感器在改变极板间隔后的电容值 fF

传感器	s/mm	C ₁₋₉	C ₁₋₁₀	C ₁₋₁₁	C ₁₋₁₂	C ₁₋₁₃
全场	0.2	241.379	3.952	0.799	0.445	0.381
	0.4	151.645	3.919	0.795	0.443	0.378
	0.6	107.246	3.864	0.788	0.441	0.374
	0.8	80.675	3.776	0.781	0.436	0.371
	1.0	62.431	3.655	0.768	0.430	0.365
	1.2	80.689	3.772	0.780	0.436	0.362
	1.4	41.827	3.421	0.742	0.417	0.357
	1.6	34.754	3.275	0.726	0.408	0.350
	1.8	28.893	3.147	0.713	0.400	0.343
	2.0	24.528	2.990	0.690	0.390	0.334

由图 4 可知，IAC 随 S 值的增大呈先上升后下降的趋势。S 值为 0.8 mm 时，IAC 取实测最大值 1.045。综合考虑，极板间隔的优化参考范围选择为 [0.7, 0.9] mm。

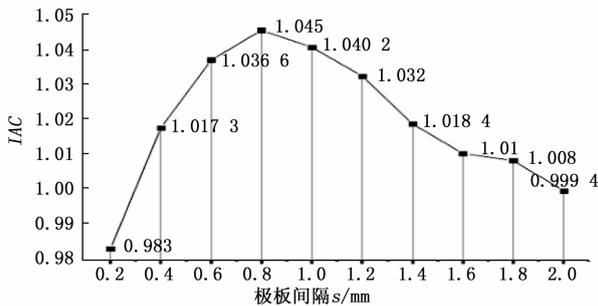


图 4 IAC 对比数据

由表 3 可知，单层电容极板越长，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，数据采集越容易。但会出现三维弱化现象，不能很好的反应管道内多相流的分布。单层电容极板越短，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。

表 3 传感器在改变单层极板长度后的电容值 fF

传感器	l/mm	C ₁₋₉	C ₁₋₁₀	C ₁₋₁₁	C ₁₋₁₂	C ₁₋₁₃
全场	11.9	80.401	3.769	0.781	0.436	0.373
	12.0	80.412	3.770	0.782	0.437	0.373
	12.1	80.418	3.771	0.784	0.439	0.373
	12.2	80.507	3.773	0.786	0.441	0.373
	12.3	80.567	3.774	0.787	0.442	0.374
	12.4	80.613	3.775	0.789	0.445	0.374
	12.5	80.676	3.776	0.790	0.446	0.374
	12.6	80.727	3.777	0.791	0.448	0.374
	12.7	80.798	3.779	0.793	0.456	0.374
	12.8	80.828	3.781	0.795	0.461	0.374

由图 5 可知，IAC 随 l 值的增大呈先上升后下降的趋势。l 值为 12.3 mm 时，IAC 取实测最大值 1.0507。综合考虑，单层电容极板长度的优化参考范围选择为 [12.2, 12.4] mm。

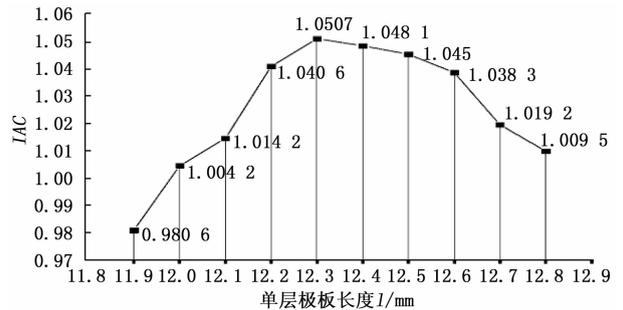


图 5 IAC 对比数据

由表 4 可知，电容极板厚度越大，全场测量电容值越大，数据采集越容易。极板厚度影响着传感器对

表 4 传感器在改变极板厚度后的电容值 fF

传感器	d/mm	C ₁₋₉	C ₁₋₁₀	C ₁₋₁₁	C ₁₋₁₂	C ₁₋₁₃
全场	0.1	54.876	3.706	0.768	0.434	0.373
	0.2	55.922	3.762	0.780	0.436	0.373
	0.3	56.712	3.783	0.782	0.436	0.373
	0.4	56.768	3.785	0.782	0.436	0.373
	0.5	58.275	3.799	0.783	0.437	0.374
	0.6	58.717	3.801	0.784	0.437	0.374
	0.7	58.823	3.803	0.785	0.437	0.374
	0.8	58.845	3.804	0.786	0.437	0.374
	0.9	58.876	3.806	0.788	0.437	0.374
	1.0	59.335	4.137	0.815	0.439	0.374

管道内介质变化的敏感程度。极板厚度过小会引起三维弱化效果, 不能很好地反映管道内介质分布状态的变化。

由图 6 可知, IAC 随 d 值的增大呈先上升后下降的趋势。 d 值为 0.3 mm 时, IAC 取实测最大值 1.092 1。综合考虑, 极板厚度的优化参考范围选择为 [0.2, 0.4] mm。

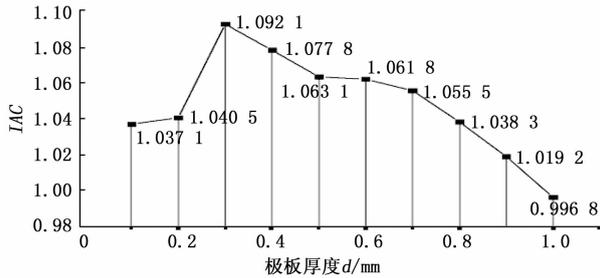


图 6 IAC 对比数据

3 电容极板的结构参数优化实验

3.1 传感器评价指标

ECT 系统传感器结构参数的优化是一个多因素, 且各因素相互影响的优化过程。本文将图像精度系数倒数 $1/IAC$ 、灵敏度影响因子 P 、电容跨度比 $C_r^{*1[16]}$ 和电容响应率倒数 $1/C_r^{*1[17]}$ 作为指标, 为传感器进行性能评价。

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^[18]。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 16 个电极, 由于对称性, 典型的灵敏度场只有 9 个, 即 1~2, 1~3, 1~4, 1~5, 1~9, 1~10, 1~11, 1~12, 1~13。本文定义灵敏度影响因子 P :

$$P = \frac{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=2}^5 |P_{i,j}| + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=9}^{13} |P_{i,j}|}{9} \quad (5)$$

$$P_{i,j} = \frac{S_{i,j}^{dev}}{S_{i,j}^{avg}} (i = 1, j = 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11, 12, 13) \quad (6)$$

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

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

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:

$$C'_{min} = C_{1,13}^m \quad (10)$$

本文定义电容跨度比, 表示为:

$$C_r^* = \frac{C'_{max}}{C'_{min}} \quad (11)$$

电容跨度比 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、图像重建精度和测量电容值这三个方面的指标。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 (4)、(5) 和 (11) 表示为:

$$y_{CEF} = P + C_r^* + \frac{1}{C_r} + \frac{1}{IAC} \quad (12)$$

可见, 综合优化函数值越小, y_{CEF} 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_{CEF} 的最小值。

3.2 正交实验设计

针对上节电容极板结构参数进行分析, 获得的优化后参考范围: 极板间隔 $s \in [0.7, 0.9]$ mm、单层极板长度 $l \in [12.2, 12.4]$ mm、极板厚度 $d \in [0.2, 0.4]$ mm。其中影响因素及水平如表 5 所示。

3.3 实验结果分析

根据有限元仿真实验生成 13 组方案的评价函数 y_{CEF} 值, 见表 6。

表 5 影响因素及水平

编号	影响因素	极板间隔	单层极板长度	极板厚度
	水平	s/mm	l/mm	d/mm
1		0.7	12.2	0.2
2		0.8	12.3	0.3
3		0.9	12.4	0.4

表 6 试验方案及仿真结果

编号	影响因素			y_{CEF}
	s/mm	l/mm	d/mm	
1	0.7	12.2	0.3	41.291
2	0.9	12.2	0.3	31.307
3	0.7	12.4	0.3	36.296
4	0.9	12.4	0.3	25.319
5	0.7	12.3	0.2	79.205
6	0.9	12.3	0.2	68.213
7	0.7	12.3	0.4	61.221
8	0.9	12.3	0.4	59.229
9	0.8	12.2	0.2	55.255
10	0.8	12.4	0.2	49.267
11	0.8	12.2	0.4	47.269
12	0.8	12.4	0.4	44.281
13	0.8	12.3	0.3	21.321

根据拟合误差最小的原则利用多种模型拟合了表 6 的实验数据, 获得了拟合分析结果, 见表 7。

表 7 拟合缺陷分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	Prob>F
线性	393.23	3	131.08	0.39	0.764 8
2FI	22.75	3	7.58	0.015	0.997 2
二次方程	2 988.16	3	996.05	90.71	0.001 9

方差分析指标是 $Prob>F$ 值, $Prob>F$ 值越小, 拟合效果越好^[19]。表 7 表明二次方程较为精确。用学生化残差图进行检验。

由图 7 可知, 残差点形似直线分布, 且点多汇聚于中部, 表明拟合效果良好。

根据表 6 的数据样本, 通过 Design - Expert 8.0 软件得到评价函数二次多项式回归模型。

$$y_{cef} = 21.32 - 2.49A - 4.24B - 4.99C - 0.25AB + 0.75AC + 2.25BC -$$

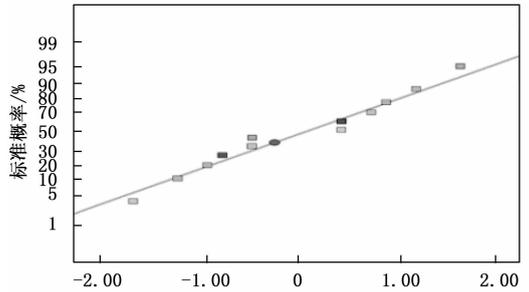


图 7 内在学生化残差图

$$2.86A^2 + 15.09B^2 + 30.56C^2$$

式中, y_{cef} 为评价函数; A 为单层极板长度; B 为极板间隔; C 为极板厚度。

P 值越大说明拟合性较差。由表 8 可知, 从极板间隔、单层极板长度、极板厚度对应的 P 值得知单层极板长度和极板厚度对性能指标影响明显, 极板间隔对评价指标影响较小, 影响从大到小依次为极板厚度、单层极板长度、极板间隔; $P < 0.05$ 表明, 在回归模型中 3 个结构参数相互影响显著。

表 8 评价函数二次多项式模型的方差分析

方差来源	均方	自由度	平方和	F 值	P 值
模型	3 404.14	9	378.24	34.44	0.007 1
A	49.80	1	49.80	4.53	0.123 1
B	144.03	1	144.03	13.12	0.036 2
C	199.40	1	199.40	18.16	0.023 7
AB	0.25	1	0.25	0.022	0.890 4
AC	2.25	1	2.25	0.20	0.681 5
BC	20.25	1	20.25	1.84	0.267 6
A^2	18.67	1	18.67	1.70	0.283 2
B^2	520.52	1	520.52	47.40	0.006 3
C^2	2 134.01	1	2 134.01	194.33	0.000 8
残差	32.94	3	10.98		
总和	3 437.08	12			

根据回归模型分析结果, 利用 Design - Expert 8.0 软件绘制各因素交互效应 3D 响应曲面图。极板间隔和极板厚度对评价函数的响应曲面如图 8 (a) 所示, 极板间隔由 0.7 mm 升至 0.9 mm 过程中, 极板厚度越大, 评价函数 y_{CEF} 随着极板厚度的增大先减小后增大; 当极板间隔由大变小时, 评价函数 y_{CEF} 随着极板厚度的增大先减小后增大。单层极板长

度和极板厚度、单层极板长度和极板厚度对评价函数的响应曲面如图 8 (b) 及 8 (c) 所示, 单层极板长度由 12.4 mm 降为 12.2 mm 过程中, 极板厚度越大, 评价函数 y_{CEF} 呈先减小后增大的趋势; 当极板厚度由大变小时, 评价函数 y_{CEF} 随着单层极板长度的增大而减小。当极板间隔由小变大时, 评价函数 y_{CEF} 随着单层极板长度的增大而减小。

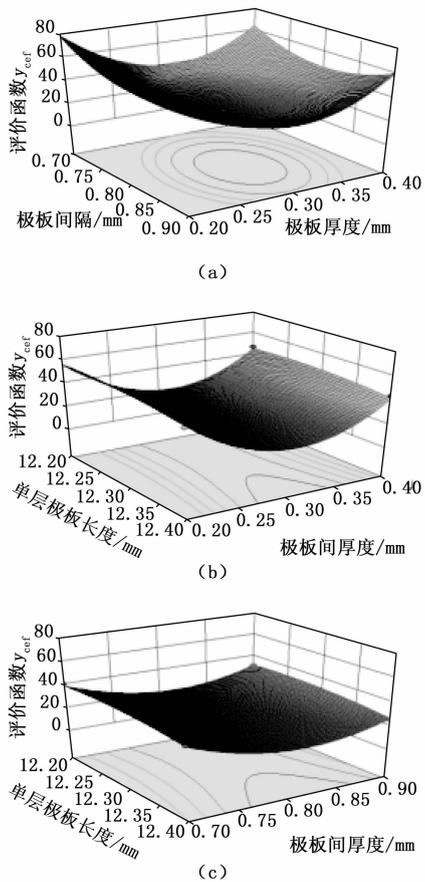


图 8 交互效应响应曲面

将 y_{CEF} 作为优化指标, 运用 Design-expert 软件推选一个 y_{CEF} 值最小的结构参数组合, 如表 9 所示。

表 9 最佳参数组合

推荐参数			值		相对误差	期望值
s/mm	l/mm	d/mm	预测	实际		
0.85	12.38	0.30	19.317	20.833	7.28%	0.962

将表 9 推选参数取整, 然后经过有限元仿真分析获取实际的 y_{CEF} 值, 和预测值的相对误差只有 7.28%, 并且期望值为 0.962, 表明 Design-expert 软件确立的评价函数 y_{CEF} 与各参数之间的数学模型可

靠。电容极板的极板间隔为 0.85 mm、单层极板长度为 12.38 mm、极板厚度为 0.30 mm 时, 传感器性能评价函数取最小值, 即得到了比较好的检测灵敏性与较均匀的灵敏度分布。

4 油气润滑 ECT 传感器优化结构验证

本节采用 Matlab 软件运行 Tikhonov 正则化^[20] 算法程序分别对基准传感器, 优化前的传感器和优化后的传感器经过 COMSOL 软件仿真实验得来的电势值, 归一化电容值数据等进行处理, 得出图像重建图形, 图像相关系数, 图像相对误差等信息。

其中基准传感器^[21] 为本团队之前优化过的 ECT 传感器, 优化前的传感器为参考传感器。Tikhonov 正则化重建图像如表 10 所示, 可以看出, 优化后传感器得到的重建图像可以减少中间处的伪影。

表 10 优化前后重建图形

基准模型	优化前	优化后

表 11 优化前后的优化率

	IRE	ICC	IAC
基准模型	0.937 4	0.537 2	0.573 1
优化模型	0.565 3	0.749 0	1.325
优化率/%	39.69	39.43	131.20

由表 11 可以看出, 基准传感器的图像相关系数平均为 0.537 2, 优化后传感器的图像相关系数平均为 0.749 0, 相比基准传感器的图像相关系数平均提高了 39.43%; 基准传感器的图像相对误差平均为 0.937 4, 优化后传感器的图像相对误差平均为 0.565 3, 相比基准传感器的图像相关系数平均提高了 39.69%; 基准传感器的图像精度系数平均为 0.573 1, 优化传感器的图像相对误差平均为 1.325, 相比基准传感器的图像精度系数提高了 131.20%。可见, 采用优化传感器得到的重建图像质量更高。

5 结束语

1) 建立了油气润滑新型十六极板 ECT 电容传感器的三维结构物理模型和数学模型, 以环状流为典型流型, 获取了电容值等信息。定义了新的图像精度指标 IAC, 定量剖析了电容极板各参数对传感器的影响。

2) 采用 Design-expert 对实验数据进行了拟合分析, 获得传感器电容极板结构参数与传感器优化函数 y_{CEF} 之间的数学模型, 并明确了各结构参数取值的最优方案, 此时电容传感器精度较高。

3) 较基准小管径油气润滑 ECT 系统中电容传感器, 优化后的传感器图像相对误差降低了 39.69%, 图像相关系数提高了 39.43%, 图像精度系数提高了 131.20%。

参考文献:

- [1] 王琦. 基于压缩传感的 ECT/CT 双模多相流成像研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [2] 范作宪, 董恩生, 曹河, 等. 同面多电极传感器敏感场计算方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (4): 1109-1111.
- [3] 陈德运, 杨从晶, 郑贵滨, 等. 电容层析成像传感器场域剖分及图像重建算法 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26 (3): 229-234.
- [4] 马敏, 郭鹏飞, 董永智. 基于双平面电容传感器的复合材料缺陷检测 [J]. 计算机应用与软件, 2021, 38 (1): 82-86.
- [5] GHALY S M A, AL-SNAIE K A, KHAN M O, et al. Design and simulation of an 8-lead electrical capacitance tomographic system for flow imaging [J]. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2021, 11 (4): 7430-7435.
- [6] 朱宇轩. AMR 线性磁阻传感器优化 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [7] 王霁阳. 三维 ECT 系统正问题仿真与传感器优化设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.
- [8] OKORO E E, RACHAEL J E, SANNI S E, et al. Liquid holdup measurement in crude oil transportation using capacitance sensors and electrical capacitance tomography: concept review [C] //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, 2021, 655 (1): 012037.
- [9] 张涛, 刘星汛, 贾云飞. 磁翻柱液位计中容栅传感器电容极板的优化设计 [J]. 天津大学学报, 2007 (1): 121-126.
- [10] 马广宇. 平行板电容式水稻含水率在线检测装置的优化设计 [D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020.
- [11] 孙启国, 闫晓丹, 钟杰. 油气润滑 ECT 系统的 RBF 图像重建算法研究 [J]. 机械设计与制造, 2021 (3): 81-84.
- [12] 黄博凯. 油气润滑 ECT 系统传感器电容值的计算与结构优化 [D]. 北京: 北方工业大学, 2018.
- [13] 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.
- [14] 孙启国, 闫晓丹, 钟杰. 油气润滑 ECT 系统的 RBF 图像重建算法研究 [J]. 机械设计与制造, 2021 (3): 81-84.
- [15] 范广永. 基于 ECT 的新型传感器优化设计及算法研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
- [16] 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.
- [17] 何伟, 孙启国. 油气润滑 ECT 系统传感器设计 [J]. 机械, 2019, 46 (3): 57-63.
- [18] 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.
- [19] 杨明, 唐彦峰. 采用 Design-Expert 分析多参数对 FDM 成型的影响与优化设计 [J]. 装备制造技术, 2017 (11): 53-56.
- [20] MARGOTTI F, RABELO J. Tikhonov-like methods with inexact minimization for solving linear ill-posed problems [J]. Inverse Problems, 2020, 36 (12): 125013.
- [21] 孙启国, 杜超, 陈超洲. 油气润滑测试系统的 ECT 传感器优化设计 [J]. 润滑与密封, 2016, 41 (12): 102-106, 116.