

## 极间距可调的 ECT 系统差分传感器设计

马敏\*, 王春波

中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300

**摘要** 针对电容层析成像传感器相邻电极间耦合电容引起的测量噪声及传统传感器需根据被检测管道的外径变化而需重新制作安装的问题,设计了一种便携式、电极对于管道轴心距离(极间距)可调节的差分电极传感器。通过控制模块调节极间距,使单一传感器能够适用于外径在 60~100 mm 动态范围内变化的管道测量。采用差分电极结构,解决了传感器无法固定合适长度的径向电极的问题,消除了传感器内部分寄生器件引起的测量噪声。实验结果表明,新型传感器可实现多种不同外径的管道的检测,差分电极的使用提高了多相流成像质量。

**关键词** 传感器; 电容层析成像; 极间距; 差分电极

中图分类号 TP212 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213202

## Design of Differential Sensors for ECT System with Adjustable Electrode Spacing

Ma Min\*, Wang Chunbo

College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

**Abstract** The noise caused by the coupling capacitance between the adjacent electrodes of an electrical impedance tomography sensor was measured to help solve the problem that traditional sensors need to be rebuilt and installed according to the change in the outer diameter of the detected pipeline. A portable differential electrode sensor with an adjustable electrode to the distance between the axes of the pipeline (electrode spacing) was designed for these measurements. The control module adjusts the electrode spacing so that a single sensor can be used for pipe measurements with an outer diameter ranging from 60 mm to 100 mm in the dynamic range. The differential electrode structure allowed the sensor to fix the radial electrode of appropriate length and eliminated the measurement noise caused by some parasitic devices in the sensor. The experimental results show that the new sensor can detect pipes with different diameters, and the differential electrode improves the imaging quality of multiphase flow.

**Key words** sensors; electrical impedance tomography; electrode spacing; differential electrode

## 1 引言

电容层析成像(ECT)技术是一种多相流参数测量的技术,通过排列在管道外壁的阵列电极,根据管道内部多相流体的介电常数分布,顺序测量出两个电极间的电容值,再利用图像重建算法,在计算机上重现管道内的形态信息<sup>[1-4]</sup>。ECT与其他检测技术相比,具有非侵入性、安全性高、响应速度快、低成本等优点<sup>[5-6]</sup>。近年来,许多研究人员对ECT技术的正、逆问题进行了研究,ECT技术已广泛应用于航空航天、石油和天然气等工业领域<sup>[7-9]</sup>。

传感器对于电容数据的采集和场内灵敏度的分布有着直接影响,决定了逆问题过程中图像重建的质量<sup>[10-15]</sup>。20世纪80年代末,英国曼彻斯特理工学院的研究小组研发了8电极ECT系统,气液、气固两相流的检测得以实现<sup>[16]</sup>;两年后该小组对传感器进行改进,将电极数量提升到了12个,实现了油气两相流的检测。Yang<sup>[17]</sup>系统地分析了传感器设计的关键问题,总结了电极数量、最佳轴向长度、屏蔽以及高温高压对传感器的影响。Peng等<sup>[18]</sup>通过有限元分析法研究了电极片参数对灵敏度分布的影响。但目前的ECT传感器设计,需要针对每一个特定的应用环境去制作相应

收稿日期: 2021-12-13; 修回日期: 2022-03-09; 录用日期: 2022-03-25; 网络首发日期: 2022-04-05

基金项目: 国家自然科学基金(61871739)

通信作者: \*mm5739@163.com

尺寸的传感器,不能实现单一传感器应用于多种外径管道的电容信息采集。并且,传感器需将电极固定在管道外壁,导致其不具有二次利用的条件,提高了成本的同时,更失去了便携性。

针对以上传统 ECT 传感器的缺点以及传感器电极间耦合电容引起的测量噪声问题,本文对 ECT 传感器做出如下改进:1)设计新型差分电极传感器;2)设计

差分电容采集电路;3)设计步进电机控制模块,控制极间距变化。

## 2 ECT 系统

ECT 系统主要由电容传感器阵列、传输线、数据处理系统、计算机成像系统四部分组成<sup>[19-21]</sup>,如图 1 所示。

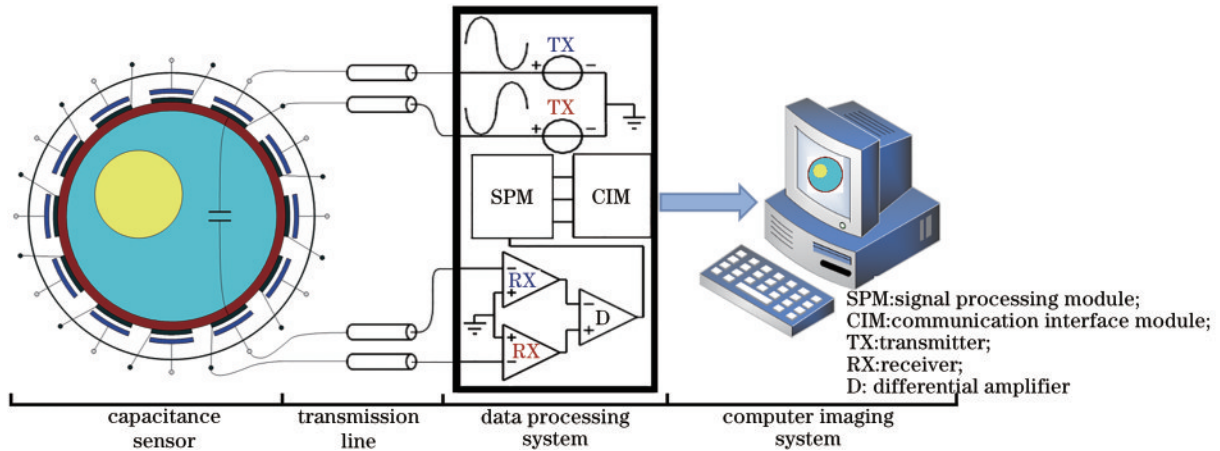


图 1 ECT 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ECT system

ECT 传感器通过安装在管道外壁的阵列电极测量出 pF 级别微小电容。传输线采用 RG174 同轴电缆,有效屏蔽外部干扰。传输线将管道内电容信号传输至基于可编程阵列逻辑(FPGA)的 ECT 数据处理系统,将电容信号转化为电压信号并进行数据处理,再通过 USB 或以太网串口等通信方式将测量的电容数据发送至计算机。计算机成像系统应用图像重建算法,实现管道内多相流的二维或三维(3D)成像<sup>[22]</sup>。

## 3 传感器原理

### 3.1 传统传感器

传统 ECT 传感器主要由测量电极、径向电极和外部屏蔽三部分组成<sup>[23]</sup>,其横截面示意图如图 2 所示。

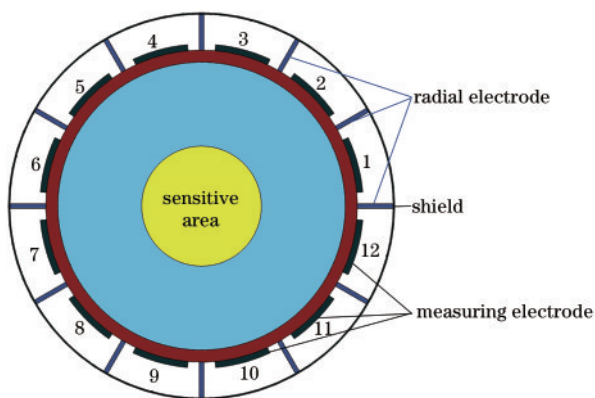


图 2 传统传感器横截面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cross-section of traditional sensor

通常情况下,两个相对放置的电极片形成一个电容器,但 ECT 系统传感器阵列电极沿着筒壁放置,相邻两个电极几乎平行,因此电容耦合情况变得复杂。通常采用加入径向电极的办法来消除电极在绝缘管道和屏蔽罩中间部分的杂散电容所带来的影响。

传统 ECT 传感器工作原理为:1)在 1 极板上施加激励信号,然后依次在 2、3、4、...、11、12 极板上采集到 11 组电信号,未参加采集过程的极板需接地处理,以排除不必要的干扰;2)以 2 极板为激励电极,3、4、...、11、12 电极依次采集 10 组电容数据;3)以此类推,直到 11 极板激励,12 极板采集得到 1 组数据,采集结束,共得到 66 个电容数据。

ECT 传感器中电容耦合情况复杂,但各电极对间具有相同的电容耦合模型,以相邻电极间为例,其电容耦合情况如图 3(a)所示,主要由管道内部电容  $C_x$  和杂散电容  $C_{s3}$ 、 $C_{s4}$  组成。 $C_x$  是电极 3 和电极 4 在管道内部形成的电容值, $C_{s3}$  和  $C_{s4}$  是电极和屏蔽罩之间形成的杂散电容<sup>[24]</sup>。通过使用 HIOKI IM3570 阻抗分析仪测量得到传统电容传感器的前端电路模型,如图 3(b)所示,由并联寄生电阻  $R_p$ 、串联寄生电阻  $R_s$ 、杂散电容值  $C_p$ 、 $C_{s3}$  和  $C_{s4}$  组成。

传统传感器具有良好的稳定性,但设计极间距可控的 ECT 传感器,显然径向电极的固定以及长度的选取就会存在一定的困难。为解决径向电极的问题,本文采用差分电极结构。

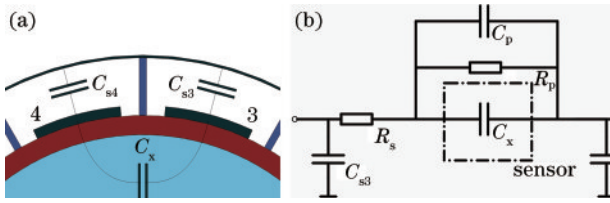


图 3 传统传感器电容测量。(a)电容耦合情况；(b)前端电路模型

Fig. 3 Traditional sensor capacitance measurement. (a) Capacitive coupling; (b) front end circuit model

### 3.2 极间距可控的差分传感器

与传统传感器不同,差分传感器舍弃了径向电极,取而代之的是在每一个测量电极后面分配一个差分电极,组成差分结构,其横截面示意图如图 4 所示。两个测量电极构成一个测量电容  $C_x$ ,与之相对应的两个差分电极构成差分电容  $C_d$ 。

差分电极传感器的相邻电极间电容耦合情况如图 5(a)所示,电容等效测量电路图如图 5(b)所示。由于  $E_3$  和  $E_3'$  都相接在后端放大部分的虚拟地上,实际

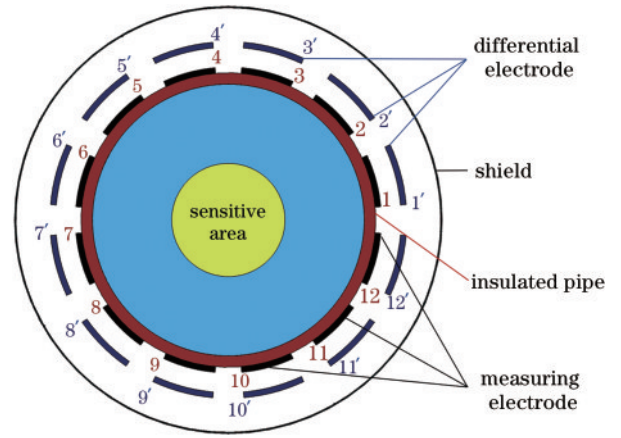


图 4 差分传感器横截面示意图

Fig. 4 Schematic diagram of cross-section of differential sensor

上  $C_{p3}$  两点不存在电势差,便不会有电流流过此电容。寄生电容  $C_{p4}$  由激励电压源直接驱动,并不会产生流过电容  $C_{p4}$  的电流。综上,寄生电容  $C_{p3}$  和  $C_{p4}$  不影响后期电容电压(C/V)转换电路的输出信号。杂散电容  $C_{s3}$  和  $C_{s4}$  也不会影响 C/V 转换电路的信号采集。

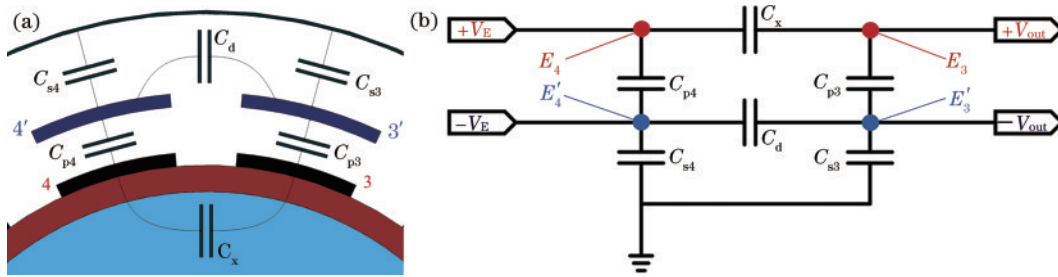


图 5 差分传感器电容测量。(a)差分传感器电容耦合；(b)差分传感器等效测量电路

Fig. 5 Differential sensor capacitance measurement. (a) Differential sensor capacitive coupling; (b) differential sensor equivalent measurement circuit

激励方式如图 5(b)所示,对测量电极施加激励信号  $+V_E$  的同时,在其相对应的差分电极上施加振幅相同相位相反激励信号  $-V_E$ ,另一对测量电极和差分电极分别接在 C/V 电路输入端,此时电容信号转化为电压信号,最后在差分放大器的输入端相加,转换为其振幅与  $(C_x - C_d)$  的值成正比的电压信号。通常只需要在 ECT 测量中获得相对的电容值,主要是因为成像的灵敏度矩阵大多数情况下可以通过合适的数值方法获得,另外成像过程中大多数算法使用归一化电容,而非绝对电容值<sup>[25]</sup>。

与传统电极结构相比,差分电极更适合设计极间距可控的传感器。新型传感器 3D 模型示意图如图 6 所示。电极组和由屏蔽罩外固定板、内层测量电极和外层差分电极三种结构组成,此种结构可作为电极在丝杠轴向滑动时,径向隔离电极无法轻易固定的有效替代方案。带有丝杠导轨的步进电机控制电极组合的径向运动,实现极间距的改变。

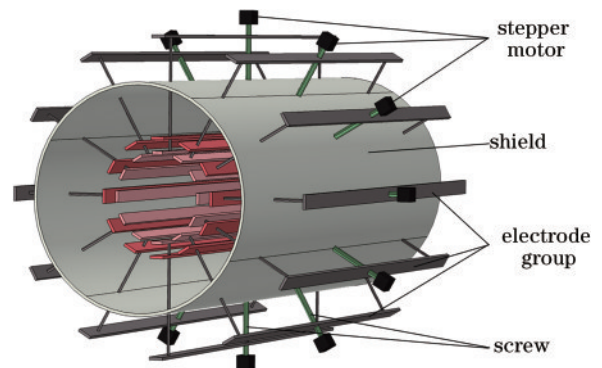


图 6 新型传感器 3D 模型

Fig. 6 3D model of new sensor

## 4 电容采集电路

改进传统 C/V 转换电路使其能应用于差分电极结构,同时由上节推论可知,杂散电容  $C_{p3}$ 、 $C_{p4}$ 、 $C_{s3}$  和  $C_{s4}$  并不影响差分传感器的信号采集过程,因此改进方案如图 7 所示。差分电极电容采集电路是完全对称

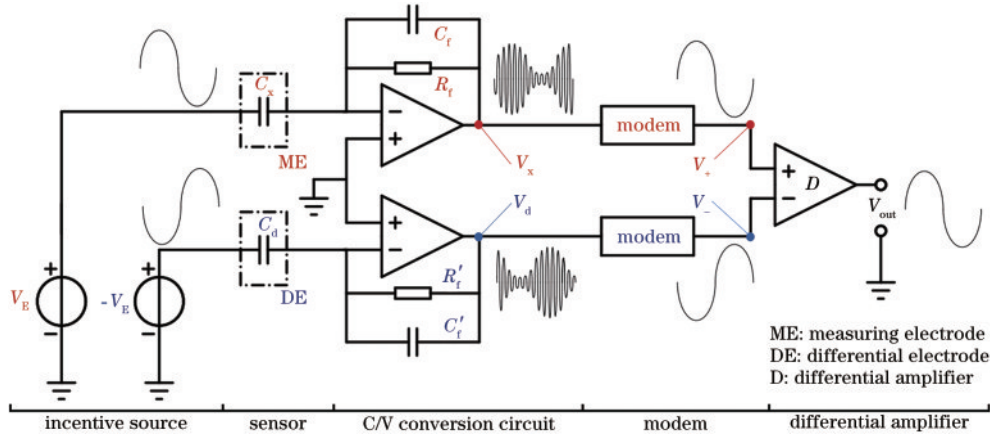


图 7 差分电极的电容采集电路

Fig. 7 Capacitance acquisition circuit of differential electrode

的,包括在印制电路板(PCB)设计上的差分走线布局。改进的 C/V 电路包括了两个激励源、两个放大器、两个调制解调器和一个差动放大电路。差动放大电路能抑制共模信号的干扰,能够抵消部分寄生器件产生的噪声。

激励源采用 AD7746 芯片,可提供频率为  $f_E$ 、振幅为  $V_E$  的激励电压源。ECT 传感器中,一对电极板上电容的耦合情况如图 3(b)所示,则图 7 中测量电容 ME 和差分电容 DE 内部的阻抗模型与如图 3(b)相同,经阻抗分析仪测量得到测量电容和差分电容的并联寄生电阻  $R_p$  大于 200 MΩ,串联寄生电阻  $R_s$  约为 0.5 Ω,杂散电容值的大小均约为 3 pF。平行于  $C_x$  的寄生电容  $C_p$  可以通过差分电路来消除,寄生电阻  $R_p$  和  $R_s$  在传递函数中引入一个高和低的截止频率,对于两个截止频率之间的频率,传递函数与寄生电阻无关。

电容采集电路的设计应对这些寄生器件有良好的免疫效果,以此来获得准确的传感器电容的输出电压值。因此,频率的选择就尤为重要。通过电路的传递函数,可推导出合适的信号源激励频率。

图 7 中  $V_E$  到  $V_x$  的传递函数表示为

$$\frac{V_x}{V_E} = -\frac{R_f}{R_p + R_s} \cdot \frac{1}{1 + j\omega R_p(C_x + C_p)} \cdot \frac{1}{(1 + j\omega R_f C_f) \left[ 1 + j\omega \frac{R_p R_s}{R_p + R_s} (C_x + C_p) \right]} \quad (1)$$

因此,频率  $f_E$  需满足以下关系

$$f_E \gg \frac{1}{2\pi R_f C_f}, \quad (2)$$

$$f_E \gg \frac{1}{2\pi R_p (C_x + C_p)}, \quad (3)$$

$$f_E \ll \frac{R_p + R_s}{2\pi R_p R_s (C_x + C_p)}. \quad (4)$$

则式(1)可改写为

$$\frac{V_x}{V_E} = -\frac{R_p}{R_p + R_s} \cdot \frac{C_x + C_p}{C_f} \approx -\frac{C_x + C_p}{C_f}. \quad (5)$$

同理:

$$\frac{V_d}{-V_E} = -\frac{R_p}{R_p + R_s} \cdot \frac{C_d + C_p}{C_f} \approx -\frac{C_d + C_p}{C_f}. \quad (6)$$

C/V 转换电路输出的电压  $V_x$  经解调电路后,输出电压信号  $V_+$ 。同理,差分环节输出电压信号  $V_-$ 。

最后,经过仪表放大器的差分放大电路输出电压信号  $V_{out}$  表示为

$$V_{out} = H_D \cdot (V_+ - V_-), \quad (7)$$

式中:  $H_D$  为差分放大电路的增益系数。显然,  $V_{out}$  是一个正比于  $(C_x - C_d)$  的电压信号,消除了寄生器件的影响。  $V_{out}$  信号经模数转换后传输给基于 FPGA 的信号处理模块进行分析。

通过以上公式推导计算可知,当  $f_E$  在传递函数的频率无关部分时,  $f_E$  的微小变化可使传感器的寄生器件对传递函数没有任何影响,因此当频率约在 50~500 kHz 时,能保证差分 C/V 转换电路工作在最佳性能。

## 5 控制电路

### 5.1 开关控制电路

开关控制部分需实现三个功能:第一种是激励模式,开关策略如图 8(a)所示,信号源的开关闭合,对电容充电;第二种是采集模式,如图 8(b)所示,电极接入 C/V 电路,实现信号的采集;第三种为接地模式,电极处于空闲状态,做接地处理,如图 8(c)所示。

激励电压源经过 MAX4617 开关芯片对电容充电,之后处于采集模式的电极通过开关芯片将信号接入信号采集模块,其余闲置电极则接地处理。这样就实现了一组差分信号的采集。

每组电容值的测量过程中,正向激励和反向激励同时作用,为避免信号在开关芯片内产生串扰,禁止将两个激励信号的控制开关封装在同一芯片中,使之具

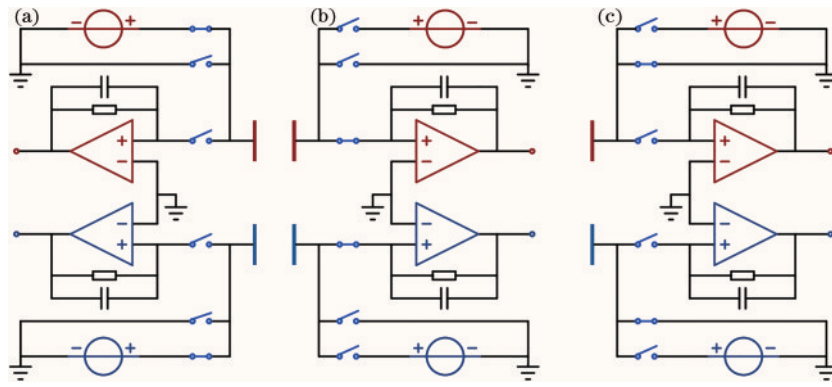


图 8 开关策略。(a)激励模式;(b)采集模式;(c)接地模式

Fig. 8 Switch strategy. (a) Excitation mode; (b) acquisition mode; (c) grounding mode

有更好的电磁兼容性。

### 5.2 极间距控制电路

采用STM32系列单片机作为极间距控制电路的控制器。步进电机选用小型两相混合式步进电机。电极组和连接在滑轨上,改变电机的正反转,推动电极组和径向运动。电机正转和反转的时序控制如图9所示,采用八拍控制。步进电机的步距角定义为

$$\theta_s = \frac{180^\circ}{PN_r} \quad (8)$$

式中: $P$ 为步进电机定子相数; $N_r$ 为转子齿数。其中选用的步进电机转子齿数为50,则基本步距角为 $1.8^\circ$ ,步距角精度为 $\pm 5\%$ 。

由于单片机不具备同时驱动多个步进电机同时工作的能力,因此采用带有晶体管H桥的L298N芯片作

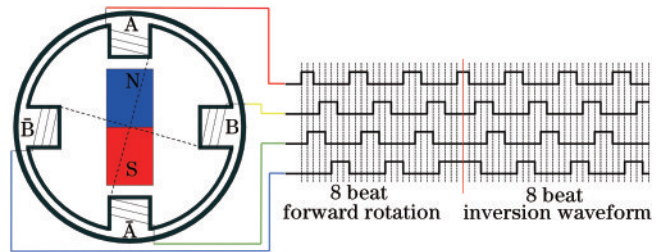


图 9 步进电机控制时序图

Fig. 9 Stepping motor control sequence diagram

为此设计中十二个步进电机的驱动器。L298N工作电压最高可达46V,额定功率为25W,持续工作电流为2A。因此一片L298N芯片可以同时稳定带载2~3个此类步进电机,节约了成本的同时也简化了PCB板的空。步进电机驱动电路简化后原理图如图10所示。

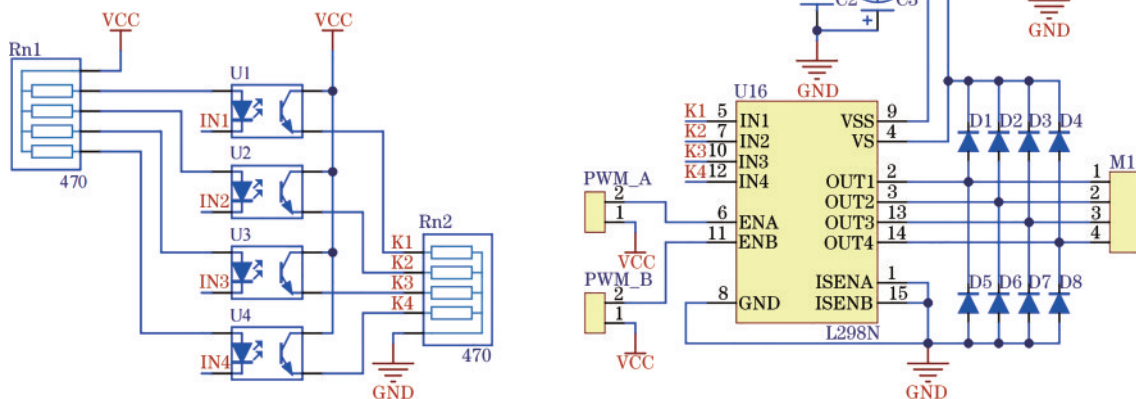


图 10 步进电机驱动原理图

Fig. 10 Schematic diagram of stepping motor drive

步进电机作为极间距调节的执行机构的同时,也是一个强力的干扰源,为隔绝步进电机的影响,需进行以下具体措施:

1) 步进电机和丝杠导轨固定在一起后需安装在传感器的金属外壁上,保证绝缘外壁完整性的同时,在丝杠导轨和金属外壁的连接处采用绝缘橡胶垫隔

离,以此完全隔绝了极间距控制模块和传感器的直接接触;

2) 差分电极模块的固定杆采用硬质塑料材质,而非金属。不仅具有较高稳定性,还不会引入干扰源。若必须采用金属材质的固定杆,则在实验过程中需接地处理。

## 6 新型传感器设计

### 6.1 参数设计

应用 COMSOL Multiphysics 5.4 有限元仿真软件设计传感器相关参数。本文建立了仿真模型,并分割成 3228 个有效单元,通过有效网络来求解场内电容值及灵敏度分布情况。现阶段已有研究人员对传感器电极个数、张角等参数进行了优化<sup>[26]</sup>。结合实际应用中多相流管道的外径范围,设计传感器参数如表 1 所示。

表 1 传感器设计参数  
Table 1 Sensor design parameters

Serial number	Name	Value
1	Number of measuring electrodes	12
2	Number of differential electrodes	12
3	Electrode thickness /mm	2
4	Electrode width /mm	15
5	Electrode length /mm	120
6	Outer diameter of shield /mm	110
7	Pipe thickness /mm	3
8	Measure the outside diameter of the pipe /mm	60-100
9	Relative dielectric constant	1 (air), 4.2 (filling medium)

按照制定参数,利用 SolidWorks 2020 软件建模并制作极间距可控的新型传感器,用以验证理论的可行性,极间距可控 ECT 系统传感器主视图和内部差分电极结构如图 11 所示。

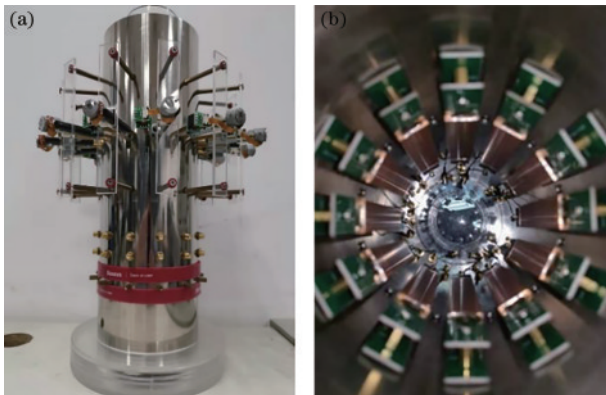


图 11 极间距可控的 ECT 传感器。(a) 新型传感器主视图;  
(b) 差分电极结构

Fig. 11 ECT sensor with controllable electrode spacing. (a) Front view of the new sensor; (b) differential electrode structure

### 6.2 图像重建算法

ECT 逆问题求解本质是由电容传感器阵列检测

到不同电极的电容值求出被测区域内物质的介电常数分布情况。图像重建的过程需要应用到图像重建算法,在 ECT 图像重建的过程中,常用的算法有迭代算法和非迭代算法两类,在本次实验过程中,采用 Tikhonov、Landweber 与 L1 正则化三种图像重建算法<sup>[27-30]</sup>,三种算法的介绍如下。

1) Tikhonov 正则化算法是基于最小二乘准则和平滑准则计算而来,其泛函模型可描述为

$$\min_x J(\mathbf{x}) = \|\mathbf{S}\mathbf{x} - \mathbf{b}\|^2 + f \|\mathbf{L}\mathbf{x}\|^2, \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{S} \subseteq \mathbf{R}^{m \times n}$  代表灵敏度矩阵;  $\mathbf{x} \subseteq \mathbf{R}^{m \times 1}$  代表介电常数向量;  $\mathbf{b} \subseteq \mathbf{R}^{m \times 1}$  代表电容测量值向量;  $m$  代表独立电容测量数;  $n$  代表网格剖分数;  $f$  代表正则化参数;  $L$  代表正则化算子。通常正则化算子取为单位矩阵,式(9)简化后通过求导可得:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{S}^T \mathbf{S} + f \mathbf{I})^{-1} \mathbf{S}^T \mathbf{b}. \quad (10)$$

正则化参数的选取对 ECT 图像重建质量的好坏起到直接影响作用,本文依据经验选取  $0.05 > f > 0$ 。

2) Landweber 迭代算法其约束泛函表示为

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{S}\mathbf{x} - \mathbf{b}\|_2^2. \quad (11)$$

通过最速下降法求解,选取梯度的负方向作为迭代方向,可得

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \alpha \mathbf{S}^T (\mathbf{S}\mathbf{x}_k - \mathbf{b}), \quad (12)$$

式中:  $\alpha$  代表迭代步长,迭代步长大小的选取影响算法的收敛性,依据收敛性可选取  $0 < \alpha < \frac{2}{\beta_{\max}}$ ,  $\beta_{\max}$  为矩阵  $\mathbf{S}^T \mathbf{S}$  最大特征值。

3) L1 正则化算法是以 L1 范数作为正则化项的优化算法,其约束泛函表示为

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{b}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{S}\mathbf{x} - \mathbf{b}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{x}\|_1, \quad (13)$$

式中:  $\lambda$  代表正则化参数,且  $\lambda > 0$ 。

本文选取交替方向乘子法对上式进行求解,可得

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \arg \min \left\{ \frac{1}{2} \|\mathbf{S}\mathbf{x} - \mathbf{b}\|_2^2 + \frac{\lambda}{2} \|\mathbf{x} - \mathbf{z}_k + \mathbf{u}_k\|_2^2 \right\} \\ \mathbf{z}_{k+1} = \arg \min \left\{ \frac{\lambda}{\rho} \|\mathbf{z}\|_1 + \frac{1}{2} \|\mathbf{z} - \mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{u}_{k+1}\|_2^2 \right\} \\ \mathbf{u}_{k+1} = \mathbf{u}_k + \mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{z}_{k+1} \end{cases}, \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{u}$  为交替方向乘子;  $\rho$  为惩罚参数,且  $\rho > 0$ 。

### 6.3 实验分析

以 60 mm、80 mm 和 100 mm 三种不同外径的管道为例验证传感器的测量效果,对每种管道进行三种模型的验证,依次是核心流、双泡流以及层流。核心流和双泡流模型测量均选用外径为 16 mm 的玻璃棒,双泡流模型两个玻璃棒圆心距为 30 mm,层流高度均为 30 mm。与之相对应地,对相同直径的传统传感器也做了以上操作。

以 60 mm 外径管道为例,各物场模型和实测方式如图 12 所示。

确定测量模型后,传感器进行电容扫描采样(基于 KEYSIGHT E4980A 系列精密 LCR 测试仪)。首先测量出空场和满场的电容值,用以数据标定。然后分别

测出多组模型 1、模型 2 和模型 3 的电容值。最后再运行 Matlab 2019a 软件对反问题求解,结合 Tikhonov、Landweber 与 L1 正则化三种图像重建算法,进行 ECT 逆问题的成像。并与相同直径的传统传感器进行对比,图像重建效果如图 13 所示。

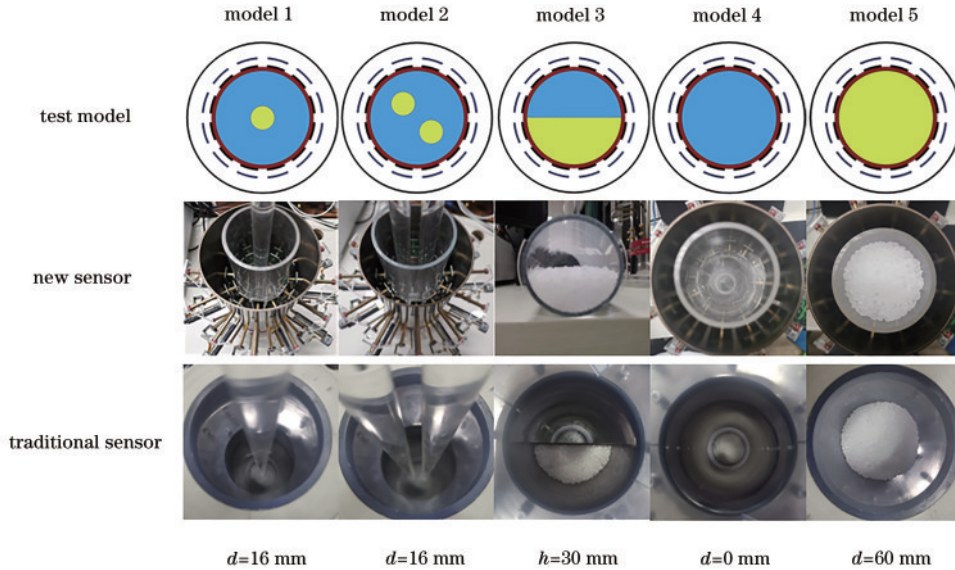


图 12 60 mm 管道物理场模型及参数

Fig. 12 Physical field model and parameters of 60 mm pipeline

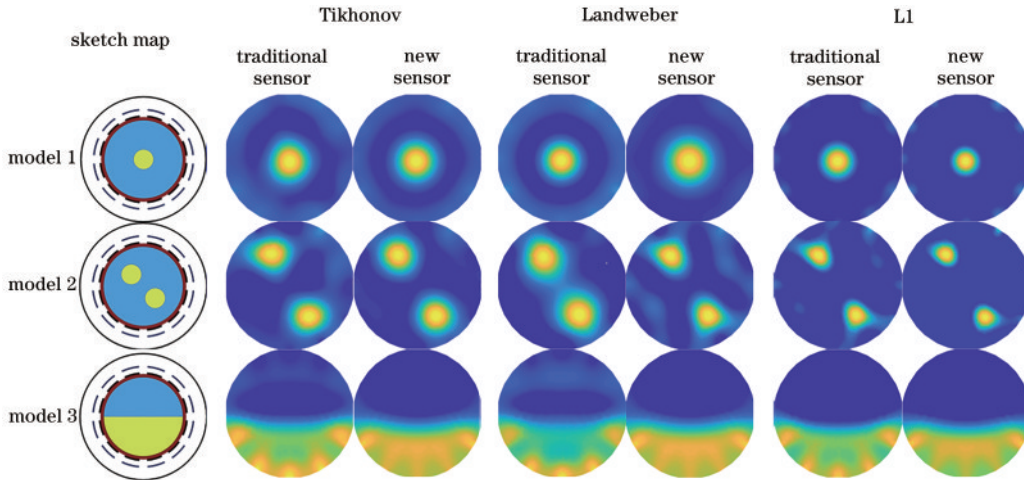


图 13 60 mm 管道图像重建效果

Fig. 13 Reconstruction effect of 60 mm pipeline image

从图 13 可以看出,传统传感器对于核心流、双泡流及层流都存在一定的电极伪影,对于传统算法也出现了不同程度的粘连现象。而新型传感器有效减少了图像重建的伪影,在双泡流模型中,当新型传感器应用传统的 Tikhonov 和 Landweber 算法时,粘连现象得以有效缓解,图像边缘也更加清晰,对于层流,新型传感器所成层流边界更加分明。

同理,对外径为 80 mm 和 100 mm 的传感器进行数据采集和图像重建,分别得到如图 14 和图 15 所示的重建图像。

由图 13~15 的对比可知,新型传感器对多种外径的管道都能进一步提高流体的成像质量,减少图像重建伪影,增强重建目标的辨识度,由此可见,新型传感器具备应用于多相流检测良好的应用前景。

为了定性评估该新型传感器的性能,采用信噪比(SNR),系统 SNR 体现系统的稳定性以及抗干扰能力,各通道信噪比其定义为

$$R_{SNR} = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^N (C_h - C_1)^2}{\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2}, \quad (15)$$

式中: $N$ 为连续重复测量的次数; $C_h$ 为满场时管道所测

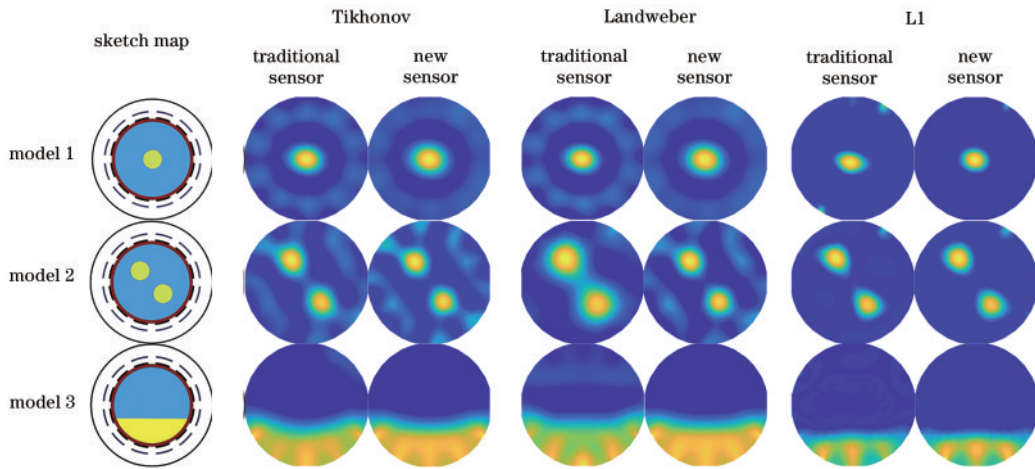


图 14 80 mm 管道图像重建效果

Fig. 14 Reconstruction effect of 80 mm pipeline image

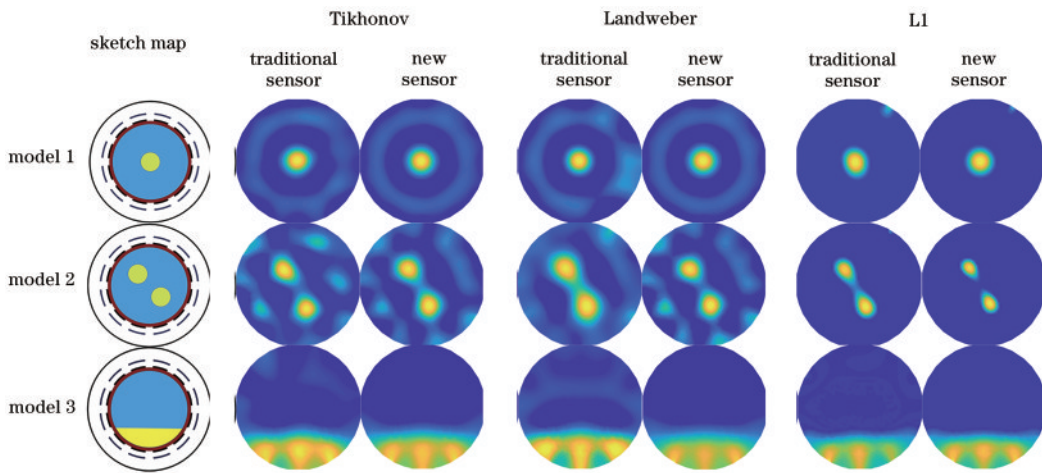


图 15 100 mm 管道图像重建效果

Fig. 15 Reconstruction effect of 100 mm pipeline image

的电容值;  $C_1$  为空闲时管道所测的电容值;  $C_i$  定义为第  $i$  次的测量值;  $\bar{C}$  为各通道重复测量的平均值。在 ECT 图像重建的过程中, 一般采用归一化的电容用于算法的反问题求解, 这实际上是电容变化和动态范围

( $C_h - C_1$ ) 的比率, 因此在计算信噪比的过程中不再选择  $C_h$  或  $C_1$ , 而是 ( $C_h - C_1$ ), 这样 SNR 对 ECT 成像更有意义。以 60 mm 外径管道为例, 传统传感器和极间距可控传感器所测数据如图 16 所示。

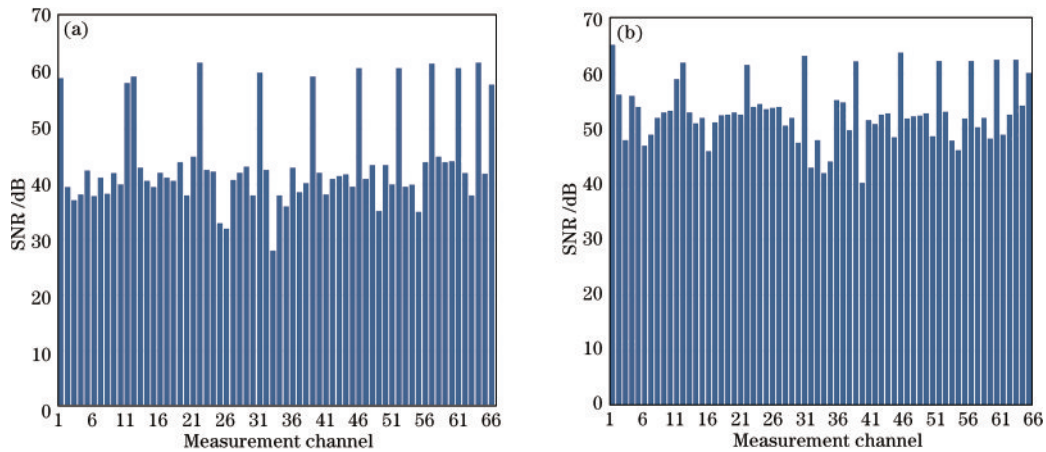


图 16 信噪比数据对比。(a)传统传感器;(b)极间距可控传感器

Fig. 16 Comparison of SNR data. (a) Traditional sensors; (b) pole spacing controllable sensor



通过数据对比可见,本文方法在大多数通道中都具有明显优势,并实现了 12.5 dB 的 SNR 平均增加。同时,差分电极的引入使得非相邻电极对通道的信噪比改善大于相邻电极。

ECT 系统作为多通道测量系统,其整体性能取决于其最低通道的 SNR 以及平均 SNR。为计算更准确,取 500 次重复测量值,定义信噪比数据的标准

差  $\sigma$  为

$$\sigma = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2, \quad (16)$$

式中:  $x_i$  是第  $i$  个通道的 SNR;  $\mu$  为各通道 SNR 的平均值。

对比 60 mm、80 mm 及 100 mm 传统传感器和新型传感器的数据对比如表 2 所示。

表 2 传统传感器和新型传感器不同管径的数据对比

Table 2 Data comparison of different pipe diameters between traditional sensor and new sensor

Sensor	60 mm		80 mm		100 mm	
	Traditional sensor	New sensor	Traditional sensor	New sensor	Traditional sensor	New sensor
Min /dB	25.9	38.5	24.5	36.8	23.5	36.1
Max /dB	62.3	63.1	61.2	62.2	60.1	61.9
$\mu$ /dB	38.4	49.6	37.2	48.5	36.5	48.1
$\sigma$ /dB	80.5	51.2	79.2	49.9	79.1	50.0

通过对比三种不同外径管道的信噪比的标准差数据可以明显看出,新型极间距可控的差分电极传感器可提供更高的平均 SNR,以及更小的 SNR 变化范围。新型传感器在适应待测管道外径变化的过程中依旧能保持良好的稳定性。由此可以得出结论,新型极间距可控的差分电极传感器可以提供更好的整体 SNR 性能。

## 7 系统验证

在实验中,数字解调功能在改进后的天津大学研

发的基于 FPGA 的 ETest 信号采集系统平台上实现,该平台通过模块化设计,可以通过适当改变前端的采集电路,来配置多种传感器的层析成像模式。基于前文所述差分 C/V 电路原理,设计出可适应于新型差分电极的信号采集部分。同样采用玻璃棒、聚乙烯颗粒和空气来模拟工业应用中的两相流环境,选取核心流、双泡流和层流进行采样测试,可达到预期效果,以 60 mm 直径管道为例,实际实验中,得到图像重建效果如图 17 所示。

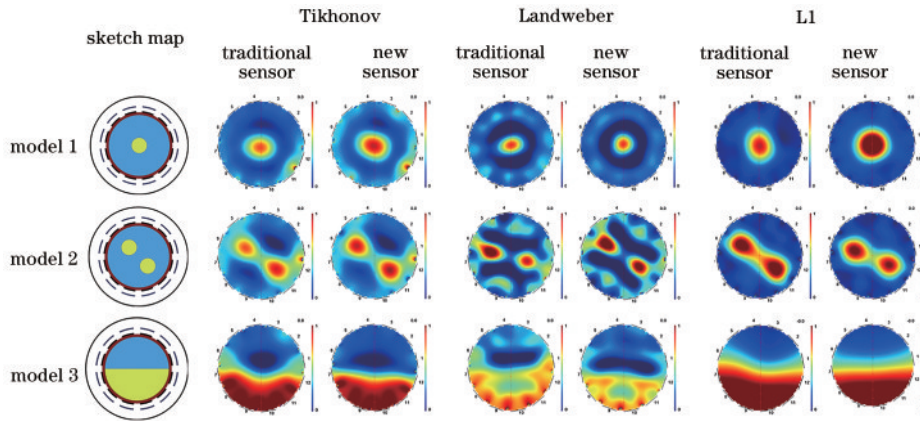


图 17 实际实验图像重建效果  
Fig. 17 Actual experimental image reconstruction effect

由图 17 可知,在应用同一传统算法重建时,新型传感器的成像质量明显优于传统传感器,所成流型更加圆滑饱满,贴近真实分布,所成流型的伪影进一步减少,充分体现了新型传感器的优势,并为新型传感器在多相流领域的应用提供依据。

## 8 结 论

本文在传统 ECT 传感器的基础上,取消径向电极,采用差分电极结构,通过添加步进电机控制模块改

变传感器的极间距,所得到的新型传感器不仅具有差分传感器噪声低、成像精度高的优势,还能适应多种外径管道的测量,可携带至不同的应用场合。极间距可控的 ECT 差分电极传感器还具有一定的便携性,容易安装和拆卸,且不损伤被测管道的优势。但是差分电极的引入增加了传感器的复杂程度,提高了制作成本,此外差分电极会占据更大的空间,限制了差分传感器的应用范围,这些问题都需要后期的改进。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang M M, Xu Y Y, Soleimani M. Quantitative reconstruction of the exterior boundary shape of metallic inclusions using electrical capacitance tomography[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(24): 8263-8270.
- [2] 王化祥. 电学层析成像技术[J]. 自动化仪表, 2017, 38(5): 1-6.  
Wang H X. Electrical tomography technology[J]. Process Automation Instrumentation, 2017, 38(5): 1-6.
- [3] Huang A, Cao Z, Sun S J, et al. An agile electrical capacitance tomography system with improved frame rates[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(4): 1416-1425.
- [4] Wang R C, Rodriguez-Frias M A, Wang H G, et al. Evaluation of electrical resistance tomography with voltage excitation compared with electrical capacitance tomography[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(12): 125401.
- [5] Huang K, Meng S H, Guo Q, et al. Effect of electrode length of an electrical capacitance tomography sensor on gas-solid fluidized bed measurements[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(47): 21827-21841.
- [6] Maung C O, Kawashima D, Oshima H, et al. Particle volume flow rate measurement by combination of dual electrical capacitance tomography sensor and plug flow shape model[J]. Powder Technology, 2020, 364: 310-320.
- [7] Hao Z H, Wang H X, Sun B Y, et al. Fluidization behavior monitoring of phosphogypsum in cyclone separator using electrical capacitance tomography[J]. Review of Scientific Instruments, 2019, 90(10): 105108.
- [8] Fan W R, Wang C. Damage detection for CFRP based on planar electrical capacitance tomography[J]. Structural Durability & Health Monitoring, 2020(4): 303-314.
- [9] Zurovec D, Hlostá J, Rozbroj J, et al. Monitoring of the discharge process of bulk material in silos using electrical capacitance tomography[J]. Chemical Engineering & Technology, 2018, 41(8): 1559-1565.
- [10] 陈德运, 高明, 宋蕾, 等. 一种新型的三维 ECT 传感器及三维图像重建方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 961-968.  
Chen D Y, Gao M, Song L, et al. Novel 3D ECT sensor and its 3D image reconstruction method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(5): 961-968.
- [11] Wang B L, Ji H F, Huang Z Y, et al. A high-speed data acquisition system for ECT based on the differential sampling method[J]. IEEE Sensors Journal, 2005, 5(2): 308-312.
- [12] 马敏, 邓晨肖, 吴轲. 平面阵列电容传感器优化[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(3): 25-29.  
Ma M, Deng C X, Wu K. Optimization of planar array capacitive sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(3): 25-29.
- [13] Meribout M, Saied I M. Real-time two-dimensional imaging of solid contaminants in gas pipelines using an electrical capacitance tomography system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(5): 3989-3996.
- [14] Cui Z Q, Wang Q, Xue Q, et al. A review on image reconstruction algorithms for electrical capacitance/resistance tomography[J]. Sensor Review, 2016, 36(4): 429-445.
- [15] 罗曼丹, 杨庆, 黄凌宇, 等. 基于微环谐振器的非接触式电流传感器[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1228001.  
Luo M D, Yang Q, Huang L Y, et al. Non-contact current sensor based on micro-ring resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1228001.
- [16] Yang W Q. Hardware design of electrical capacitance tomography systems[J]. Measurement Science and Technology, 1999, 7(3): 225-232.
- [17] Yang W Q. Design of electrical capacitance tomography sensors[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(4): 201-213.
- [18] Peng L H, Mou C H, Yao D Y, et al. Determination of the optimal axial length of the electrode in an electrical capacitance tomography sensor[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2005, 16(2/3): 169-175.
- [19] 刘靖, 姜凡, 刘石. 非闭合电极电容层析成像传感器在冻土测试中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(2): 363-368.  
Liu J, Jiang F, Liu S. Application of unclosed electrode electrical capacitance tomography sensor in measurement of frozen soil[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(2): 363-368.
- [20] 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, 36(3): 307-310.  
Wang H X, Zhang L F, Zhu X M. Optimum design of array electrode for ECT system[J]. Journal of Tianjin University, 2003, 36(3): 307-310.
- [21] Kjærsgaard-Rasmussen J, Meyer K E. Inside-out electrical capacitance tomography[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2011, 22(2): 104-109.
- [22] 张立峰, 王化祥. 基于 SVM 及电容层析成像的两相流流型识别[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(4): 812-816.  
Zhang L F, Wang H X. Identification of two-phase flow regime based on support vector machine and electrical capacitance tomography technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(4): 812-816.
- [23] 王化祥, 汪婧, 胡理, 等. ERT/ECT 双模态敏感阵列电极优化设计[J]. 天津大学学报, 2008, 41(8): 911-918.  
Wang H X, Wang J, Hu L, et al. Optimal design of ERT/ECT dual-modality sensing electrode array[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(8): 911-918.
- [24] 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 M, Fan G Y, Wang T. ECT-based sensor system optimization design[J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(8): 87-91.
- [25] 郭志恒, 律德财, 邵富群, 等. 基于特征值谱区域优化的 Tikonov 正则化实现 ECT 图像重建[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(19): 6641-6649.  
Guo Z H, Lü D C, Shao F Q, et al. Realization of ECT image reconstruction by Tikonov regularization technology based on eigenspectrum region optimization[J]. Proceedings

- of the CSEE, 2021, 41(19): 6641-6649.
- [26] Huang K, Meng S H, Guo Q, et al. Effect of electrode length of an electrical capacitance tomography sensor on gas-solid fluidized bed measurements[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(47): 21827-21841.
- [27] 王化祥, 唐磊, 闫勇. 电容层析成像图像重建的总变差正则化算法[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(11): 2014-2018.  
Wang H X, Tang L, Yan Y. Total variation regularization algorithm for electrical capacitance tomography[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(11): 2014-2018.
- [28] 伍俊龙, 郭正华, 陈先锋, 等. 基于深度学习的光场成像三维测量方法研究[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1204005.  
Wu J L, Guo Z H, Chen X F, et al. Three-dimensional measurement method of light field imaging based on deep learning[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1204005.
- [29] 马敏, 孙美娟. 基于改进线性 Bregman 算法的 ECT 图像重建算法[J]. 计量学报, 2021, 42(7): 879-884.  
Ma M, Sun M J. Image reconstruction algorithms of ECT system based on the modified linearized bregman algorithm[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(7): 879-884.
- [30] Lou Y F, Yan M. Fast  $L_1$ - $L_2$  minimization via a proximal operator[J]. Journal of Scientific Computing, 2018, 74(2): 767-785.