

基于声学层析成像的密闭容器温度场重建

王冉旭 郭新华

(武汉理工大学机电工程学院 武汉 430070)

摘要: 密闭容器内部温度测量可预防因温度过高或过低导致的设备损坏和安全事故。现有研究针对密闭容器内温度的测量大多是侵入式、单点式测量。提出一种基于声学层析成像的密闭容器温度场可视化方法,通过径向基函数逼近声慢函数来建立正问题模型,在模型中引入全变分正则化约束项,用交替方向乘子算法求解声学逆问题。同时建立有限元仿真模型,分析声波在密闭容器中的传播特性。仿真结果表明:仿真计算的传播时间与理论值的最大相对误差为1.80%,重建温度场与模型温度场的误差在3%内。最后,构建声学温度场实验测试系统,采用实验进一步验证声学测温的可行性,实验结果表明声学技术可以对装有液体的密闭容器进行温度场重建。本研究对于测量内部温度和预防过热故障来确保设备稳定运行具有重要意义。

关键词: 声学层析成像;密闭容器温度场;全变分正则化;交替方向乘子

中图分类号: TN911.72; TB551 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Reconstruction of temperature field in closed container based on acoustic tomography

Wang Ranxu Guo Xinhua

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Temperature measurements inside closed vessels can prevent equipment damage and safety accidents caused by high or low temperatures. Most of the existing studies on temperature measurement inside closed vessels are intrusive and single-point measurements. A method for visualizing the temperature field of a closed vessel based on acoustic tomography is proposed, in which a positive problem model is established by approximating the acoustic slow function distribution through a radial basis function, a full variational regularization term constraint is introduced into the model, and the acoustic inverse problem is solved by an alternating direction multiplier algorithm. At the same time, a finite element simulation model is established to analyze the propagation characteristics of the acoustic wave in the closed container. The simulation results show that the maximum relative error between the simulated propagation time and the theoretical value is 1.80%, and the error between the reconstructed temperature field and the modeled temperature field is within 3%. Finally, an acoustic temperature field experimental test system is constructed and experiments are used to further verify the feasibility of acoustic temperature measurement, and the experimental results show that the technique can reconstruct the temperature field of closed containers with liquids. This study is important for measuring the internal temperature and preventing overheating faults to ensure the stable operation of the equipment.

Keywords: acoustic tomography; closed vessel temperature field; total variation regularization; alternating direction multiplier

0 引言

在电力、能源、化工生产等领域中,温度是需要进行监测的关键物理量。石油^[1]、酸碱腐蚀性液体、酒^[2]等液体介质储存在密闭容器中,这些液体介质的储存对温度条件具有严格要求,温度过高或过低都会对其产生不利影响。因

此,对容器内部温度场进行实时、准确的监测是十分重要的。然而,传统的接触式测温存在一定的局限性。接触式测温需要和被测物体直接进行接触,这会破坏待测对象的温度场。此外,接触式测温大多只能实现单点测量,难以反映温度场的分布情况。为了满足密闭容器内部温度场重建的需求,需要一种非接触式高精度的温度场重建技术。

层析成像^[3]是一种根据相关数据(声波、射线等)重建物体内部图像的非侵入式测量技术,已经广泛应用于炉膛温度场重建^[4]、光学成像处理^[5]以及工业无损检测^[6]等多个领域。声学层析成像(acoustic tomography, AT)是层析成像的一种,通过向待测区域发射声波,根据声波传播时间(time of flight, TOF)来重建待测区域的温度场分布^[7]。该技术具有测温范围广、精度高、抗干扰性强等优点,可以避免常规测温的局限性,可以完成对密闭容器温度场的准确重建。近年来,国内外学者把 AT 技术应用在许多不同的领域中。Dokhanchi 等^[8]将 AT 技术用于监测室内空气的温度分布,采用数值方法优化待测区域内换能器的安装位置,对室内空气的温度完成了高精度测量。Otero 等^[9]首次将 AT 技术用于高亚音速马赫数气流中的速度和温度分布的监测,采用特征射线检测(eigenray detection)方法计算声波在流体中的传播路径,提高温度场重建的精度。石友安等^[10]采用 AT 技术重建固体内部的温度场,基于传播路径和等效热边界求解二维瞬态非均匀温度场。

目前,热电偶、红外成像测温^[11]以及分布式光纤^[12]可用于密闭容器内部温度的检测,但都有一定的局限性。热电偶需要将传感器放入待测物体中。红外成像只能测量物体表面的温度,无法深入测量内部的温度分布。分布式光纤需要在表面或内部安装光纤,安装过程复杂且成本较高。超声波具有很好的方向性和较强的穿透能力,根据声阻抗原理,声波可以穿透容器壁和内部的液体介质。声波进入容器后,会在液体-容器壁两层介质的分界处发生折射和反射^[13]。通过分析容器内的声波传播,反射波传播时间总是落后于直达波时间。通过测量直达波飞渡时间^[14],利用声波层析成像技术重建容器内部温度场。

本文基于声学层析成像原理,采用超声波测温技术对密闭容器内的温度分布进行监测。为了提高温度场重建精度,提出用径向基函数(radial basis function, RBF)逼近复杂函数声慢的分布,引入全变分正则化(total variation, TV)约束项,通过交替方向乘子算法(alternating direction method of multipliers, ADMM)求解温度场重建逆问题,从而实现温度场的重建和可视化。通过有限元分析技术,研究声波在密闭容器中的传播情况。搭建声学测温硬件平台,实验结果验证了该方法用于密闭容器温度场重建中的可行性。

1 声学温度场重建原理

AT 温度场重建的基本原理是超声波在容器液体中的传播速度会随着温度发生变化,本次实验以密闭容器内部的变压器绝缘油为研究对象,根据有关文献,声速 v 与变压器绝缘油的绝对温度 T 之间关系可表示为^[15]:

$$v = 1420 - 3.369 \cdot 10^{-3}(T - 293.15) \quad (1)$$

超声波在容器壁的传播速度是 5 900 m/s,壁厚大约为 5 mm,考虑到声波在容器壁中的传播时间较短,时间近

似于 10^{-7} s,忽略超声波在容器壁中的传播时间。

如图 1 所示,声波在容器壁 A 点至 B 点传播速度可表示为:

$$v = l/t \quad (2)$$

式中: l 为 A、B 两点间距; t 为变压器绝缘油中 A 点至 B 点声波飞行时间。

根据式(1),可以将温度表示为:

$$T = (2407.7 - v)/3.369 \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

根据式(2),在待测区域周围布置超声波换能器,形成多条有效声波路径,测量超声波传播时间,选择合适温度场重建算法,计算待测区域声速分布。根据式(3)声速和温度关系,可以重建待测区域温度分布。如图 1 所示,两侧分别设置 9 个声波发射点和接收点,超声波发射换能器依次安装在发射点,接收换能器安装在接收点。每个发射点发出声波后,对面 9 个换能器接收超声波,每个测试周期,形成 81 条有效声波路径。

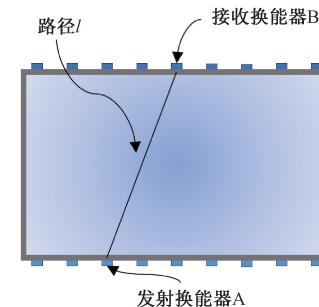


图 1 超声波换能器安装位置(俯视图)

Fig. 1 Ultrasonic transducer mounting position (top view)

2 温度场重建算法

2.1 声学 AT 正问题建模

正问题核心是在已知待测区域温度分布和换能器位置的前提,求解声波路径传播时间。声波选取 M 条有效的超声波传播路径,声波沿某条传播路径 l_i 的传播时间 t_i 可表示为介质内声慢函数 $f(x, y)$ 沿 l_i 的线积分^[16],如式(4)所示。

$$t_i = \int_{l_i} \frac{1}{v(x, y)} dl_i = \int_{l_i} f(x, y) dl_i \quad (4)$$

式中: $f(x, y)$ 代表声速的倒数分布函数,即声慢分布函数; l_i 代表第 i 条传播路径; t_i 代表第 i 条路径对应的声波传播时间。

将待测区域划分为 N 个子区域, $f(x, y)$ 采用 N 个径向基函数的线性组合来表示,有:

$$f(x, y) = \sum_{j=1}^N \alpha_j \varphi_j(x, y) \quad (5)$$

式中: $\varphi_j(x, y)$ 为径向基函数; α_j 为待定系数; (x, y) 代表每个子区域中心点坐标。

根据式(4)、(5)可推导出:

$$t_i = \sum_{j=1}^N \alpha_j \int_{l_i} \varphi_j(x, y) dl_i = \sum_{j=1}^N A_{ij} \alpha_j \quad (6)$$

用径向基函数逼近方法建立正问题模型,可以得到矩阵形式:

$$\mathbf{t} = \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha} \quad (7)$$

式中: \mathbf{t} 是声波飞渡时间向量; \mathbf{A} 是系数矩阵。

针对待测区域,在换能器安装位置以及子区域划分方式确定之后,TOF 向量可以测量出来。径向基函数形状及参数确定之后,矩阵 \mathbf{A} 随之可计算出来。根据式(7)采用逆问题求解算法,可反解出待定系数向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 。将 $\boldsymbol{\alpha}$ 代入式(5)得到声慢分布,进一步根据声速和温度的关系可以重建出待测区域温度场。

2.2 声学 AT 逆问题求解

逆问题是在已知声波在介质中传播数据,反推出待测区域内部的物理参数分布。AT 温度场重建问题核心是求解矩阵 $\mathbf{t} = \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha}$,在实际应用中,待测区域划分方式 N 大于有效声波路径 M ,重建矩阵 \mathbf{A} 的病态性严重,求解往往因为模型不确定性和问题本身的非唯一性而变得非常困难,正则化方法通过引入额外约束条件从而有效求解大型病态逆矩阵。全变分正则化是正则化方法中的一种^[17],可将式(7)转化为以下问题:

$$\min_{\boldsymbol{\alpha}} \frac{1}{2} \|\mathbf{A}\boldsymbol{\alpha} - \mathbf{t}\|_2^2 + \beta \text{TV}(\boldsymbol{\alpha}) \quad (8)$$

式中: $\|\mathbf{A}\boldsymbol{\alpha} - \mathbf{t}\|_2^2$ 是误差项,表示求解值和真实值的误差; $\text{TV}(\boldsymbol{\alpha})$ 是全变分正则化项; β 是正则化参数,用于平滑数据和逼近真实情况。

经典的 TV 正则化为:

$$\text{TV}(\boldsymbol{\alpha}) = \sum_{i=1}^N \|(\mathbf{D}\boldsymbol{\alpha})_i\|_2 \quad (9)$$

式中: $(\mathbf{D}\boldsymbol{\alpha})_i$ 是 $\boldsymbol{\alpha}$ 在子区域 i 处的离散梯度。

交替方向乘子算法是一种用于优化问题的迭代算法,可以有效解决正则化优化问题,采用该算法对式(8)进行求解^[18]。引入辅助变量 \mathbf{z} ,将全变分正则化项和数据项进行分离,式(8)可以写为:

$$\begin{cases} \min_{\boldsymbol{\alpha}} \frac{1}{2} \|\mathbf{A}\boldsymbol{\alpha} - \mathbf{t}\|_2^2 + \beta \phi(\mathbf{D}\boldsymbol{\alpha}) \\ \mathbf{z} = \mathbf{D}\boldsymbol{\alpha} \end{cases} \quad (10)$$

将原问题拆分为两个问题进行求解,构造拉格朗日函数为:

$$\begin{aligned} L(\boldsymbol{\alpha}, \mathbf{z}, \mathbf{u}) &= \frac{1}{2} \|\mathbf{A}\boldsymbol{\alpha} - \mathbf{t}\|_2^2 + \beta \sum_{i=1}^n \|\mathbf{z}_i\|_2 + \\ &\mathbf{u}^\top (\mathbf{D}\boldsymbol{\alpha} - \mathbf{z}) + \frac{\rho}{2} \|\mathbf{D}\boldsymbol{\alpha} - \mathbf{z}\|_2^2 \end{aligned} \quad (11)$$

式中: \mathbf{u} 是拉格朗日乘子; ρ 是惩罚参数,用于调节约束的惩罚度。

根据 ADMM 算法原理,第 $k+1$ 次迭代结果为:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\alpha}^{k+1} &= \arg \min_{\boldsymbol{\alpha}} \left[\|\mathbf{A}\boldsymbol{\alpha} - \mathbf{t}\|_2^2 + \rho (\mathbf{u}^k)^\top \mathbf{D}\boldsymbol{\alpha} + \frac{\rho}{2} \|\mathbf{D}\boldsymbol{\alpha} - \right. \\ &\left. \mathbf{z}^k\|_2^2 \right] \end{aligned} \quad (12)$$

$$\mathbf{z}^{k+1} = \arg \min_{\mathbf{z}} \left[\frac{\beta}{\rho} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{z}_i\|_2 + \frac{1}{2} \|\mathbf{D}\boldsymbol{\alpha}^{k+1} - \mathbf{z} + \mathbf{u}^k\|_2^2 \right] \quad (13)$$

$$\mathbf{u}^{k+1} = \mathbf{u}^k + \mathbf{D}\boldsymbol{\alpha}^{k+1} - \mathbf{z}^{k+1} \quad (14)$$

完整的 ADMM 迭代步骤如式(12)~(14)所示,这个过程不断重复,直至满足收敛条件。即原始残差和对偶残差小于某个阈值。

采用声学测温技术对密闭容器内部温度场进行重建时,步骤可分为:

- 1) 建立测温模型,确定待测液体介质中声速随温度变化的关系式。
- 2) 确定超声波发射和接收点,采集 TOF 数据。
- 3) 确定径向基函数的类型,计算系数矩阵 \mathbf{A} 。
- 4) 利用全变分正则化和 ADMM 算法计算得到温度场分布。

3 仿真与分析

3.1 建立仿真模型

有限元分析是一种在工程领域中有着广泛应用的数值模拟技术,借助有限元软件模拟声波在密闭容器中传播,计算超声波传播时间。三维模型计算资源需求较大,为了提高仿真效率,将三维模型简化为二维模型进行处理。

如图 2 所示,图 2(a)是容器三维示意图,选择高度 0.4 m 二维截面进行研究。如图 2(b)所示,绝缘油箱截面长为 1 m,宽为 0.5 m,容器壁厚 5 mm。选择其中一个发射点 T2 发射超声波,9 个接收点接收声波。

为了深入探究超声波在非均匀温度场中的传播特性,我们在仿真的背景条件下导入随位置变化的温度场模型。以单峰温度场模型为例:

$$T(x, y) = 20 \times e^{-\frac{(x-0.5)^2+(y-0.25)^2}{0.1}} + 293 \quad (15)$$

研究对象是装有变压器绝缘油的密闭容器,主要涉及到两种材料:变压器绝缘油和结构钢。两种材料属性如表 1 所示,表格中 v 代表式(1)的声速,变压器油声速会随温度的变化而变化。由于声波在容器壁中的传播时间非常短,忽略容器壁的声速变化。

采用压力声学模块进行声波传播的数值仿真,压力声学能够准确描述声压场在介质中的分布和传播情况。为了模拟声波在介质界面处的反射和透射现象,在边界上设置阻抗边界条件,容器外壳材料声阻抗是 $46.02 \times 10^5 / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$,内部液体变压器绝缘油的声阻抗是 $1.26 \times 10^5 / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ 。

为了有效地模拟超声波换能器发出的信号,激励信号选择经 Hanning 窗调制的正弦信号,其中心频率为 20 kHz,如图 3 所示。声源信号频率会影响到网格划分大小,网格单元长度应小于波长的 1/8。

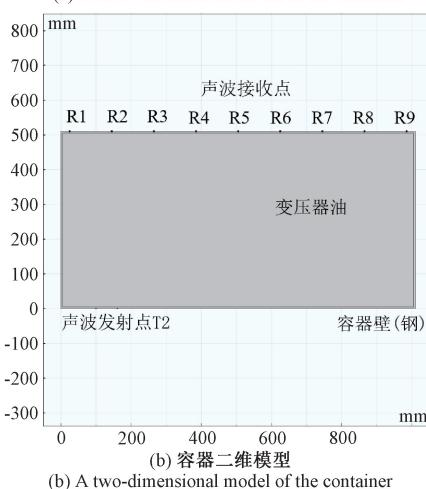
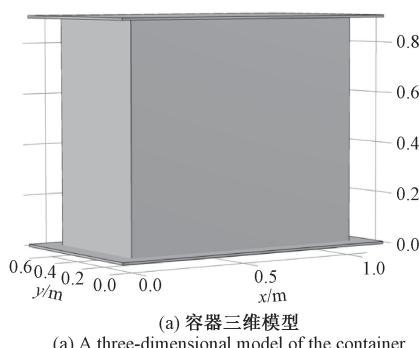


图 2 容器有限元模型

Fig. 2 Finite element model of container

表 1 材料属性参数

Table 1 Parameters of material properties

材料	密度/(kg·m ⁻³)	声速/(m·s ⁻¹)
容器外壁	7 850	5 900
绝缘油	8 900	v

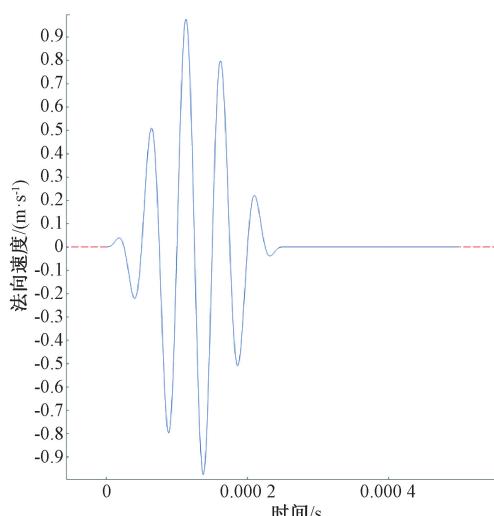


图 3 声波激励信号

Fig. 3 Acoustic excitation signal

3.2 声波传播分析

声波进入容器后,一部分声波会透射出去并被接收换能器所接收,另一部分在容器内部进行多次折射和反射^[19]。时间 $t=0$ s 时,发射点发出超声波,在四个不同时刻,声压分布情况如图 4 所示。为了提高超声波信号透射率,在容器壁和探头之间涂上耦合剂。认为超声波信号在探头和变压器外壳间不会发生折反射。图 4(a)是 $t=2 \times 10^{-4}$ s 时刻,进入容器壁的超声波一部分透射至容器内部变压器绝缘油中,声压显示在均匀介质中声波近似于沿直线传播。图 4(b)是 $t=4 \times 10^{-4}$ s 时刻,声波在碰到容器壁后,一部分声波透射出去被接收换能器所接收;另一部分声波会继续发生发射。图 4(c)是 $t=6 \times 10^{-4}$ s 时刻,声波进行多次折射和反射,随着传播距离增加会发生衰减。图 4(d)是 $t=8 \times 10^{-4}$ s 时刻,声速由于温度分布不均匀的原因会发生变化,声波会发生弯曲。

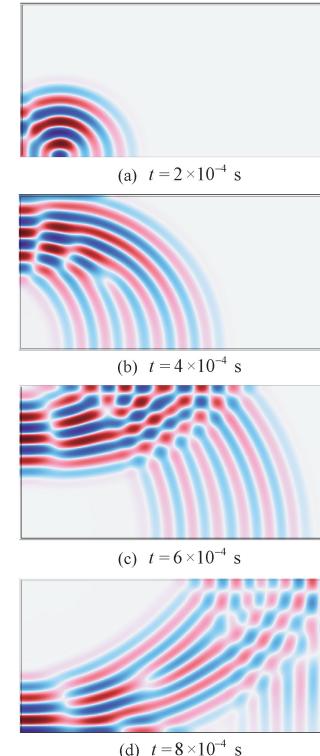


图 4 密闭容器内部声场分布图

Fig. 4 Sound field propagation diagram in the container

在 T2 发出声波后,R1~R9 各点接收到的波形如图 5 所示。根据接收信号波形,可以计算得出超声波传播时间。

为了进一步验证有限元仿真的正确性,将仿真模拟得到的首波传播时间值和理论值进行比较,如表 2 所示。理论值是基于温度场模型下,采用曲线积分计算得出结果。相对误差最大为 1.80%,仿真结果与理论结果的误差比较小,可以利用有限元软件进行声波传播仿真计算。

3.3 仿真结果及分析

为了进一步验证所提算法有效性,采用所提算法对有

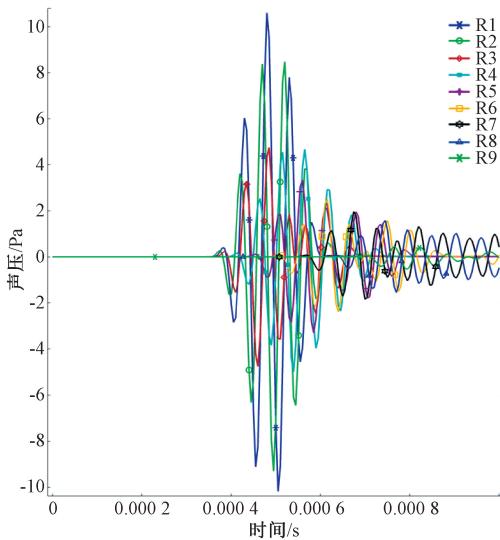


图 5 接收点 R1-R9 波形

Fig. 5 Waveforms at R1-R9 receive points

表 2 声波传播时间仿真结果与理论值

Table 2 Simulation results and theoretical value of sound wave travel time

路径	仿真/ms	理论值/ms	绝对误差/ms	相对误差/%
T2,R1	0.358	0.364	0.006	1.65
T2,R2	0.357	0.356	0.001	0.28
T2,R3	0.369	0.368	0.001	0.27
T2,R4	0.396	0.399	0.003	0.75
T2,R5	0.454	0.446	0.008	1.80
T2,R6	0.508	0.503	0.005	0.99
T2,R7	0.667	0.567	0.010	1.77
T2,R8	0.629	0.636	0.007	1.10
T2,R9	0.704	0.707	0.003	0.42

限元数据进行计算重建。按照图 1 所示,发射点和接收点各设置 9 个,待测区域划分为 $20 \times 10 = 200$ 个子区域(虚线划分),有效声波路径 81 条。

针对式(15)所示的单峰温度场模型,原模型和算法重建结果如图 6 所示。从图 6(b)可以看出,采用本文所提算法可以较好地重建和反映温度场的分布,等温线的形状些许变形,中心区域重建精度较高,边缘区域存在信息缺失。

在单峰温度场基础上,进一步对双峰温度场进行仿真验证。双峰温度场模型可以表达为:

$$T(x, y) = 20 \times e^{-\frac{(x-0.1)^2 + (y-0.15)^2}{0.1}} + 20 \times e^{-\frac{(x-0.9)^2 + (y-0.35)^2}{0.1}} + 293 \quad (16)$$

双峰温度场重建结果如图 7 所示。相较于单峰温度场,双峰温度场更加复杂。AT 技术有着较好的重建效果,可以直观显示温度场的分布。但是同样在边缘区域的重建效果不理想。

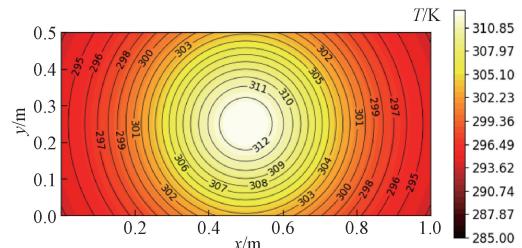
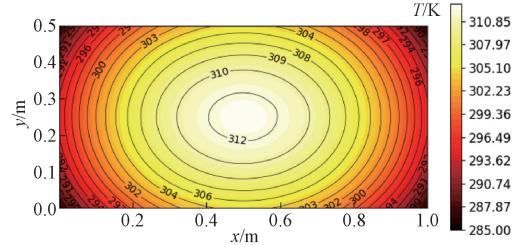
(a) 模型温度场
(a) Temperature field of the model(b) 重建温度场
(b) Reconstruction of temperature field

图 6 单峰模型温度场与重建温度场对比

Fig. 6 Comparison of temperature field between unimodal model and reconstruction model

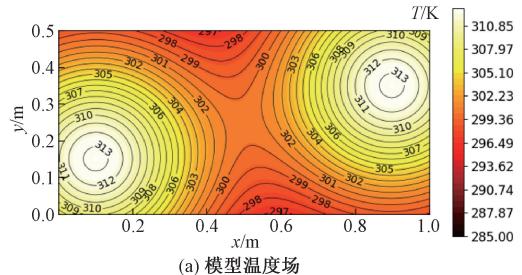
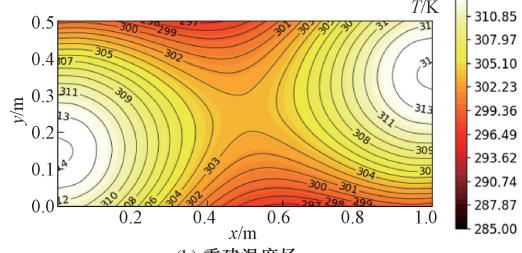
(a) 模型温度场
(a) Temperature field of the model(b) 重建温度场
(b) Reconstruction of temperature field

图 7 双峰模型温度场与重建温度场对比

Fig. 7 Comparison of temperature field between Twin Peaks model and reconstruction

为了准确评价温度场重建算法精度,采用平均误差 E_{mean} 和均方根误差 E_{rms} 来计算温度场重建性能指标。

$$E_{mean} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \left| \frac{TR_i - T0_i}{T0_i} \right| \right) \times 100\% \quad (17)$$

$$E_{rms} = \frac{1}{T_{mean}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (TR_i - T0_i)^2} \times 100\% \quad (18)$$

式中: TR_i 和 $T0_i$ 是采用算法重建温度场中和模型温度场中第 i 个子区域中心点温度; T_{mean} 是温度场的平均温度。

温度场重建误差如表 3 所示。结合图 6 和 7,本文所提方法基本上可以正确重建模型温度场。相较于双峰温度场,单峰温度场重建精度更高。

表 3 温度场重建误差

温度场	均误差 E_{mean}	均方根误差 E_{rms}
单峰温度场	1.24	1.71
双峰温度场	2.12	2.45

为了对仿真实验结果进行进一步的分析,给出重建图像和模型温度场的温差分布图。如图 8 和 9 所示,仿真结果重建图像和设定的模型有一定的误差。造成误差的因素主要是以下方面:1)有限元仿真会对物理过程进行假设和简化,会导致和实际的偏差。2)温度场重建算法重建精度不够高,算法本身存在一定的局限性。3)声波传播时间的计算存在误差。针对上述误差来源,可以通过改进仿真模型、优化温度场重建算法以及提高声波传播时间计算精度来提高温度场重建的精度。

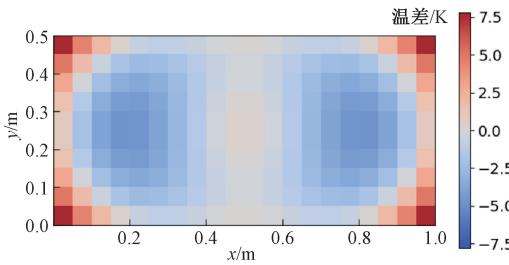


图 8 单峰温度场重建的温差分布图

Fig. 8 Temperature difference of single-peak temperature field reconstruction

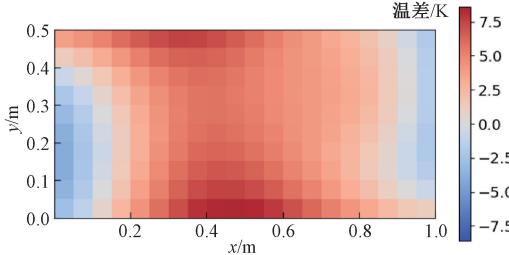


图 9 双峰温度场重建的温差分布图

Fig. 9 Temperature difference in reconstruction of bimodal temperature field

4 实验研究

4.1 实验平台

为了验证 AT 技术在实际密闭容器中的应用,对储存变压器油的密闭容器进行温度场重建实验。如图 10 所示,AT 温度场重建实验系统包括超声波换能器、换能器固定装置、脉冲发生仪、声波放大器、同步数据采集卡和 PC 计

算机组。声波接收换能器采用清诚公司生产的 G80 型声发射传感器,其谐振频率为 80 kHz,频率范围为 20~180 kHz,灵敏度峰值超过 70 dB。



图 10 实验装置图

Fig. 10 Diagram of experimental apparatus

将超声波换能器通过磁吸装置固定在密闭容器外壳上,待测区域为 $1 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 长方形区域。将待测区域均匀划分为 $20 \times 10 = 200$ 个网格。换能器安装位置示意图和声波形成路径如图 11 所示。换能器的数量和安装位置会影响声波传播路径,进而影响温度场重建精度。以发射点一侧为例,以左侧容器内壁为基准起点,T1 处换能器的中心应距离容器内壁 20 mm。后续换能器(T2~T9)的中心位置依次以 120 mm 的等间距向后排列,即每个换能器中心与前一个换能器中心的间距为 120 mm。

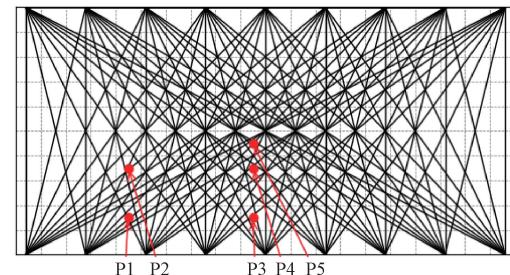


图 11 换能器位置与声波路径

Fig. 11 Transducer position and sound path

4.2 实验结果

为了模拟异常情况的液体温度场,用加热棒对变压器绝缘油进行加热。加热前,默认变压器绝缘油温度是均匀 293 K。通电加热 8 h 后取出加热棒。选择中心频率 80 kHz 超声波换能器,脉冲发生仪激励换能器发出声波。每个测量周期内,T1~T9 发射点依次发射声波,对面 R1~R9 接收超声波。以一对收发声波为例,如图 12 所示,T2 发射时,采集卡会收到一个同步信号,如通道 2。通道 1 代表 R4 接收到的声波。

上位机采集声波并计算超声波路径的传播时间,采用重建算法计算出速度场分布,利用式(3)计算出 200 个子区域的温度分布,再用插值方法得到整个区域温度场分布。

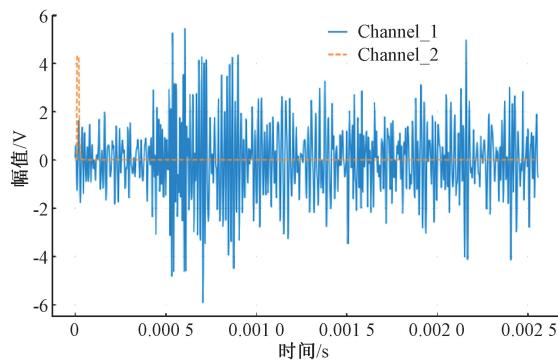


图 12 接收超声波信号

Fig. 12 To receive an ultrasonic signal

重建温度场图像如图 13 所示。

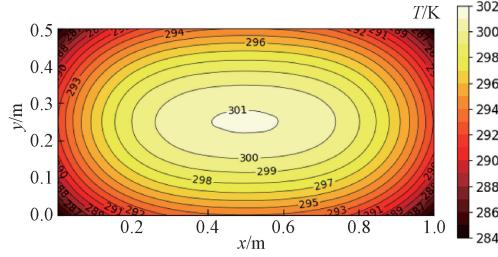


图 13 实验重建温度场

Fig. 13 Reconstruction of temperature field by experiment

为了进一步验证本文所提算法重建温度场准确度,在待测区域中选择 5 个观测点,用热电偶测量该 5 个点标准温度,分别为 P1~P5。如表 4 所示,计算算法重建温度和热电偶标准温度相对误差,相对误差在 3% 之内,其衡量算法重建值与真实值之间偏离程度。

表 4 实际温度场重建误差

Table 4 Reconstruction error of actual temperature field

观测点/mm	算法重建温度/K	热电偶测量温度/K	相对误差/%
P1(225,75)	297.74	300.0	0.75
P2(225,175)	299.95	305.5	1.81
P3(475,75)	298.89	303.5	1.52
P4(475,175)	301.01	308.9	2.55
P5(475,225)	303.16	309.8	2.14

5 结论

本文主要是探究声学层析成像技术用于重建容器内部温度场的可行性。针对声学逆问题求解中存在的病态问题,本文提出径向基函数拟合声慢分布,全变分正则化联合交替方向乘子的温度场重建算法。借助有限元仿真超声波在密闭容器中传播特性。仿真和实验结果表明,AT 技术可以较好重建出密闭容器二维温度场分布,温度场重建误

差在 3% 内。换能器安装位置、超声波飞渡时间测量以及重建算法都会影响温度场重建精度,在后续研究中,可以在这些方面进行改进。在应用领域方面,AT 测温技术可以用于电力变压器、石油储罐、管道流体、啤酒发酵罐等液体温度场重建。

参考文献

- [1] LIU J Y, ZHAO J, SI M L, et al. Effect of periodic change of ambient temperature on the temperature field in the single disc floating roof oil tank[J]. Journal of Applied Science and Engineering, 2020, 23 (1): 129-142.
- [2] LACHOWICZ S, WJDYŁO A, CHMIELEWSKA J, et al. The influence of yeast type and storage temperature on content of phenolic compounds, antioxidant activity, colour and sensory attributes of chokeberry wine [J]. European Food Research & Technology, 2017, 243(12): 2199-2209.
- [3] 宋一娇,孔慧华,李剑,等.基于超拉普拉斯正则化的冲击波超压层析重建[J].电子测量技术,2024,47(10): 160-167.
- [4] SONG Y J, KONG H H, LI J, et al. Shock wave overpressure tomographic reconstruction based on super-Laplacian regularization [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(10): 160-167.
- [5] ZHANG SH P, SHEN G Q, AN L S, et al. Online monitoring of the two-dimensional temperature field in a boiler furnace based on acoustic computed tomography[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75(1): 958-966.
- [6] 郑晓钊,姚纪阳,李华军,等.基于遗传算法的光学层析成像的结构优化[J].光学学报,2023,43(3): 57-67.
- [7] ZHENG X ZH, YAO J Y, LI H J, et al. Structural optimization of optical tomography imaging based on genetic algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(3): 57-67.
- [8] KHAIRI M T M, IBRAHIM S, YUNUS M A, et al. Ultrasound computed tomography for material inspection: Principles, design and applications [J]. Measurement, 2019, 146: 490-523.
- [9] ZHU B, ZHONG Q SH, CHEN Y SH, et al. A novel reconstruction method for temperature distribution measurement based on ultrasonic tomography [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2022, 69(7): 2352-2370.
- [10] DOKHANCHI N S, ARNOLD J, VOGEL A, et al. Measurement of indoor air temperature distribution using acoustic travel-time tomography: Optimization of transducers location and sound-ray coverage of the

- room[J]. Measurement, 2020, 164: 107934.
- [9] OTERO R JR, LOWE K T, NG W F, et al. Coupled velocity and temperature acoustic tomography in heated high subsonic Mach number flows[J]. Measurement Science & Technology, 2019, 30(10): 105901.
- [10] 石友安, 魏东, 曾磊, 等. 超声固体测温中的二维温度场重建算法研究[J]. 中国科学(技术科学), 2019, 49(5): 518-530.
- SHI Y AN, WEI D, ZENG L, et al. Research on two-dimensional temperature field reconstruction algorithm in ultrasonic solid temperature measurement [J]. Scientia Sinica Technologica, 2019, 49(5): 518-530.
- [11] 张天宇, 吴嘉雯, 方弘毅, 等. 复杂背景下三维弯曲表面红外测温修正[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 184-192.
- ZHANG T Y, WU J W, FANG H Y, et al. Infrared temperature measurement correction for three-dimensional curved surfaces under complex backgrounds[J]. Journal of Instrumentation, 2023, 44(5): 184-192.
- [12] 介瑞敏, 肖春, 刘旭, 等. 拉曼分布式光纤温度传感: 技术发展与应用综述[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 222-247.
- JIE R M, XIAO CH, LIU X, et al. Raman distributed optical fiber temperature sensing: A review of technological development and applications[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 222-247.
- [13] 钱定冬, 宋柯, 谢虎波, 等. 基于GCC-MSSA的变压器局放超声内部定位方法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(3): 134-141.
- QIAN D D, SONG K, XIE H B, et al. Ultrasonic internal localization method of transformer localized discharge based on GCC-MSSA [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(3): 134-141.
- [14] 郭军, 高文静, 蔡国斌, 等. 基于伪随机序列的松散煤体声学测温方法及应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 123-131.
- GUO J, GAO W J, CAI G B, et al. Acoustic temperature measurement of loose coal body based on pseudo-random sequence and its application[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 123-131.
- [15] 蔡君懿. 变压器局部放电源超声波定位方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- CAI J Y. Research on ultrasonic localization method for partial discharge sources in transformers [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [16] 李艳秋, 刘石. 融合动态演变信息的声学三维温度场重建[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(11): 1711-1718.
- LI Y Q, LIU SH. Acoustic three-dimensional temperature field reconstruction incorporating dynamic evolution information [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(11): 1711-1718.
- [17] FENG D SH, CAO C, WANG X. Multiscale full-waveform dual-parameter inversion based on total variation regularization to on-ground GPR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2019, 57(11): 9450-9465.
- [18] XUE H, CHEN H W, WANG X N. Design of robust polynomial beamformers using worst case performance optimization via alternating direction method of multipliers[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(7): 7690-7704.
- [19] 涂彦明, 张劲, 何宇航, 等. 变压器局部放电检测声阻抗匹配研究[J]. 四川电力技术, 2023, 46(1): 50-53.
- TU Y M, ZHANG J, HE Y H, et al. Research on acoustic impedance matching for transformer partial discharge detection [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2023, 46(1): 50-53.

作者简介

王冉旭, 硕士研究生, 主要研究方向为超声测温。

E-mail: 927996407@qq.com

郭新华(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为声学测量与识别。

E-mail: xguo@whut.edu.cn