

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.11.003

融合动态演变信息的声学三维温度场重建^{*}

李艳秋 刘 石

(华北电力大学 能源动力与机械工程学院 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室 北京 102206)

摘 要:在声学层析成像方法测量锅炉温度场的应用中,温度场重建算法的精度和速度起着重要作用。建立了三维温度场声学重建的动态模型,提出了同时考虑声学测量信息和温度场动态演变信息的动态重建算法。建立了一个融合声学测量信息、温度场的空间约束及动态演化信息的目标函数,在光滑约束法的基础上构建了反映相邻空间像素位置关系的正则矩阵,采用 Tikhonov 正则化和优化相结合的方法求解目标函数。仿真模拟研究表明,与最小二乘、代数重建法和标准 Tikhonov 正则化算法等静态重建算法相比,融合动态演变信息的温度场重建算法的重建速度相仿,而重建精度有显著提高并对于测量数据误差具有更好的数值稳定性,为声学温度场重建提供了一种可行性极高的有效方法。

关键词: 声学测温;三维温度场;重建算法;动态演变信息;正则矩阵

中图分类号: TK31; TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4010

Acoustic 3D temperature field reconstruction fused
dynamic evolution information

Li Yanqiu Liu Shi

(MOE's Key Lab of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment, School of Energy
Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Accuracy and speed of reconstruction algorithm play an important role in the temperature field measurement for a boiler by acoustic tomography. A dynamic model of a 3D temperature field reconstruction by acoustic tomography is established. A dynamic reconstruction algorithm is proposed considering both the acoustic measurement information and the dynamic evolution information of the temperature field. An objective function is built, which fuses the measurement information, space constraint of the temperature field and the dynamic evolution information. A regularization matrix is established based on the smooth constraint method which reflects the positional relationship between spatially adjacent pixels. A method combining Tikhonov regularization and optimization is adopted to solve the function. The numerical simulations show that the reconstruction speed of the algorithm fusing dynamic evolution information is similar to static reconstruction algorithm including the least square method, the algebraic reconstruction technique and the standard Tikhonov regularization algorithm. The image quality and noise immunity of the algorithm fusing dynamic evolution information are better than the results obtained from the static algorithms. An innovative method with high effectiveness is provided for temperature field reconstruction by acoustic.

Keywords: acoustic tomography; 3D temperature field; reconstruction algorithm; dynamic evolution information; regularization matrix

0 引 言

大型锅炉炉内温度场的分布能快速反映炉内燃烧情

况,炉内温度场的分布直接影响煤粉的着火、燃尽以及锅炉的安全性,温度场的测量对于锅炉燃烧控制和诊断具有极为重要的意义。由于大型电站锅炉炉膛温度高、待测量空间大及燃烧的复杂性等原因,传统的温度测量方

法如热电偶和一些需要使用精密仪器的测量方法很难准确测量出整个工业炉内的温度场。声学测温法是一种新型的温度可视化测量技术,自20世纪80年代以来得到快速发展。声学CT温度场重建技术通过测量声波从多个方向穿过被测区域的飞行时间,采用适当的温度场重建算法推算出被测区域的温度分布。这属于典型的逆问题研究,因此快速而又具有一定精度的重建算法是实现被测区域温度场重建的关键。

典型的声学层析成像温度场重建算法可以分为二维和三维重建。二维温度场重建的主要算法有最小二乘法(least square method, LSM)^[1-3]、傅里叶正则化方法^[4]、高斯函数与正则化算法^[5]、代数重建算法(algebra reconstruction technique, ART)^[6]、Tikhonov 正则化方法^[7-9]、径向基函数和奇异值分解^[10]、基于迭代和插值算法^[11]、RBF神经网络^[12]、遗传算法^[13]等。三维温度场重建的主要算法包括最小二乘和SVD算法^[14]、CGLS和LSQR^[15]、基于RBF神经网络方法^[16]、ART和SIRT算法^[17]、Tikhonov 正则化和TSVD 正则化方法^[18]等。

通常,以上算法在推动声学测温技术的发展和成功应用起到了重要作用。但是这些算法只考虑了声学测量过程中的测量信息,而没有考虑温度场处于动态变化过程中的时间动态信息,即都是静态重建算法。而实际应用中,声学层析成像技术测量的温度场是随时间变化的对象,处于动态过程的温度场在不同时刻之间的图像具有紧密相关性。因此,同时考虑声学测量信息、空间约束和温度场的动态发展信息对于提高温度场重建质量是非常重要的,采用融合动态演变信息的重建算法来重建温度场更为合理。另外,温度场重建经常表示为优化问题,研究用于实际的有效算法非常重要。本文采用融合动态演变信息的动态成像算法(algorithm fusing dynamic evolution information, AFDEI)重建温度场,提出了一个同时考虑声学测量信息、空间约束和温度场动态发展信息的目标函数,设计了以光滑约束法为基础的正则矩阵。通过仿真模拟验证了所提出的动态重建算法的可行性。

1 声学法温度场重建原理及静态模型

声学法气体测温的基本原理是基于气体介质中声波的传播速度是该气体介质温度的函数^[19]:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{m}} = Z\sqrt{T} \quad (1)$$

式中: v 是声波在气体介质中的传播速度,m/s; R 是摩尔气体常数,J/mol·K; γ 是气体比热比, T 是气体的绝对温度,K; m 是气体的摩尔质量,kg/mol; $Z = \sqrt{\gamma R/m}$,对某种特定气体为一常数。

声学测温原理是根据多条路径上的声波飞渡时间

(time of flight, TOF)来求解三维温度场分布的过程。在得到每条路径上的声波飞渡时间测量数据之后,将温度场离散化,建立温度场各个离散网格温度值与TOF值之间关系的代数方程组,从而把重建温度场的问题转化为求解方程组的问题。

假设声学测温系统中有 M 条声波路径,将三维的炉膛空间划为 N 个网格。声波沿任一条声波路径的飞行时间可表示为:

$$y_i = \int_{L_i} \frac{1}{v_j(x, y, z)} dl + n_i = \int_{L_i} f_j(x, y, z) dl + n_i \quad (2)$$

式中: y_i 表示声波沿第 i 条声波路径的飞行时间, L_i 代表第 i 条声波射线的传播路径, (x, y, z) 表示单元位置, $v_j(x, y, z)$ 为第 j 个成像单元的声速, $f_j(x, y, z)$ 为第 j 个像素单元的慢度(即速度的倒数), n_i 是测量噪声。经过一个周期的测量得到一组方程组,该方程组可以简化为用矩阵形式表示的静态重建模型:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{F} + \mathbf{n} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{A} \in R^{M \times N}$ 表示第 i 条射线被第 j 个成像单元截取的线段长度, $\mathbf{Y} \in R^M$ 为实际测量的时间向量TOF, $\mathbf{F} \in R^N$ 表示空间状态因子,为声波速度的倒数。 M 表示通过温度场区域可测得的独立飞行时间总数, N 为重建区域内划分的像素个数, $\mathbf{n} \in R^M$ 表示飞行时间测量数据中噪声的向量。利用合适的重建算法计算出 $\mathbf{F}$,再根据式(4)得到温度场分布 $T(x, y, z)$ 。

$$T(x, y, z) = \frac{1}{F(x, y, z)^2 Z^2} \quad (4)$$

2 动态重建模型及求解方法

静态温度场重建模型只考虑声波飞行时间的测量信息,但是没有考虑温度场的动态演变信息。研究显示增加声学温度场重建信息的数量能提高重建质量^[5]。对于温度场来说,增加信息量的一个直接方法就是同时利用声波测量信息和温度场的动态发展信息。因此,动态重建模型可以表示为:

$$\mathbf{F}_{k+1} = g(\mathbf{F}_k, \mathbf{w}_k) \quad (5)$$

$$\mathbf{y}_k = h(\mathbf{F}_k, \mathbf{u}_k) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{F}_k$ 表示时刻 k 的慢度变量, $g(\cdot)$ 描述温度场测量中用一系列偏微分方程表示的动态发展信息, $h(\cdot)$ 是测量方程, $\mathbf{y}_k$ 代表时刻 k 的TOF值, $\mathbf{w}_k$ 和 $\mathbf{u}_k$ 分别代表动态发展方程和测量方程中的不确定性。为了实现快速重建,式(5)和(6)可以近似为线性公式:

$$\mathbf{F}_k = \mathbf{B}_k \mathbf{F}_{k-1} + \mathbf{w}_k \quad (7)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{A}_k \mathbf{F}_k + \mathbf{u}_k \quad (8)$$

式中: $\mathbf{B}_k$ 是时刻 k 的状态转移矩阵, $\mathbf{A}_k$ 表示测量算子。如果设 $\mathbf{B}_k = \mathbf{I}$, $\mathbf{I}$ 是单位矩阵,式(7)可以看做纯随机游走

演变模型。实际中当不知道更好的时间动态模型时通常采用该模型^[20]。

由于直接求解方程(7)和(8)存在很大难度,因此考虑把求解方程(7)和(8)转化为优化问题。依据 Tikhonov 正则化理论和优化理论知识,优化问题可表示为:

$$\min_{F_k} J = \|y_k - A_k F_k\|^2 + \lambda_1 \|D_k F_k\|^2 + \lambda_2 \|F_k - B_k F_{k-1}\|^2 \quad (9)$$

λ_1 和 λ_2 分别是非负的正则化参数, D 是正则矩阵, $\|D F_k\|^2$ 是正则项,即由 Tikhonov 正则化法确定的温度场空间约束函数,起着平衡解的精确性和稳定性的作用。本文的动态图像重建算法的计算过程同时结合了随机演化模型和线性测量方程。目标函数是解一个无约束的优化问题,根据优化理论得到目标函数的解:

$$F_k = (A_k^T A_k + \lambda_1 D_k^T D_k + \lambda_2 I)^{-1} (A_k^T y_k + \lambda_2 B_k^T F_{k-1}) \quad (10)$$

在逆问题重建过程中,正则化参数的选取对于重建结果的精度起着重要作用。正则化参数的选取一直是处理不适定问题的一个难题,目前尚没有一种适应各种不适定问题的正则化参数选取方法。本文正则化参数 λ_1 和 λ_2 的选择是多正则化参数选择问题,通常可采用 L 超平面方法求解^[21]。L 超平面作为经典 L 曲线法的多维扩展,是残差范数与约束范数在合适尺度内的一条曲线。直观上,L 超平面的“广义拐角”应该是对于正则误差和扰动误差近似平衡的点。L 超平面方法的主要缺点是由于大量正则化参数直接估计高斯曲率最大值的计算代价很大。另外,采用常规的最优化技术定位高斯曲率最大值点受到高斯曲率函数有多个极值的限制。本文采用非常便于优化的最小距离函数法^[22]确定正则化参数,使得由这个函数优化得到的正则化参数接近 L 超平面方法。

令 $O = (a, b_1, b_2)$ 表示原点的坐标。最小距离函数 $\nu(\lambda)$ 是从原点到 L 曲线上点的距离:

$$\nu(\lambda) = |\psi[z(\lambda)] - a|^2 + \sum_{i=1}^2 |\psi[x_i(\lambda)] - b_i|^2 \quad (11)$$

式中:

$$\psi(t) = \log(t) \quad (12)$$

$$z(\lambda) = \|Y - A F^*(\lambda)\|_2^2 \quad (13)$$

$$x_i(\lambda) = \Phi_i[R_i F^*(\lambda)] \quad i = 1, 2 \quad (14)$$

其中 λ 和 F^* 的定义如下:

$$F^*(\lambda) = \operatorname{argmin}_F \{ \|Y - A F\|_2^2 + \lambda_1 \|D_k F_k\|^2 + \lambda_2 \|F_k - B_k F_{k-1}\|^2 \} \quad (15)$$

最小距离点是 L 曲线的高斯曲率为正而且 $\nu(\lambda)$ 达到局部极值的点。

$$\lambda^* = \operatorname{argmin}_{\lambda \in R^{k+1}} \nu(\lambda) \quad (16)$$

通常可以利用任意优化技术来找到 λ^* ,但是,许多优化算法需要求 $z(\lambda)$ 和 $x_i(\lambda)$ 相对于 λ_i 的高阶偏微分,而这些偏微分要从 $\frac{\partial F^*(\lambda)}{\partial \lambda_i}$ 依次计算,通过解大小与原问题相同的线性系统得到。为便于计算,利用最小距离函数的基本性质,得到一个用于 λ^* 的固定点算法。

$$\lambda_i^{(k+1)} = \frac{z(\lambda^{(k)})}{x_i(\lambda^{(k)})} \left(\frac{\log[x_i(\lambda^{(k)})] - b_i}{\log[z(\lambda^{(k)})] - a} \right), \quad i = 1, 2 \quad (17)$$

式中: $\lambda^{(k)}$ 是正则化参数在第 k 步的向量。算法从一个合适的正则化参数初始向量 $\lambda^{(0)}$ 开始,迭代停止准则为迭代量的相对变化量小于 10^{-4} 。

正则矩阵 D 的选择可以根据不同的研究对象来选取,根据矩阵 $D^T D$ 的选取不同,可得到不同的正则化方法。本文在光滑约束法的基础上,根据三维温度场是连续分布的特点,构造了适合三维温度场重建的正则算子。

光滑约束法的原理是通过式(18)来构建正则算子。

$$D^T D = X^T X + I_n \quad (18)$$

其中 X 为光滑矩阵,其元素组分 $X_{i,j}$ 定义为:

$$X_{i,j} = \begin{cases} 1, & j = i \\ \frac{1}{p}, & j \in \Omega_i \\ \frac{1}{p}, & j \in \Phi_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1 \leq i, j \leq N) \quad (19)$$

式中: Ω_i 为与第 i 个空间像素点边界相邻的像素集合, Φ_i 为与第 i 个空间像素点顶角相邻的像素集合。由于所测量区域内的三维温度场是连续分布的,区域内任一空间像素与邻近空间像素的关系可以分为图 1 所示的 4 种情况。当空间像素位于 8 个角上时,如图 1(a) 所示;当空

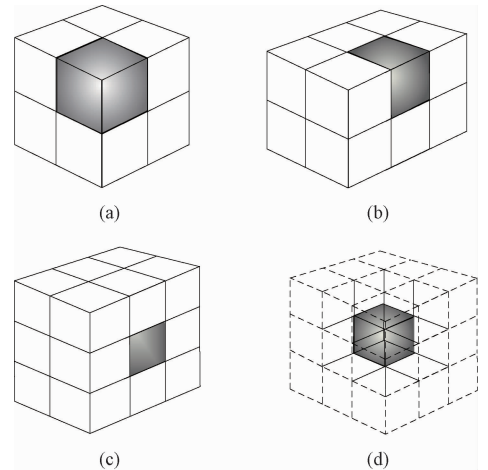


图 1 三维温度场空间像素之间的相邻关系

Fig. 1 The adjacent relation between space pixels of 3D temperature field

间像素位于边线中间像素位置时,如图 1(b) 所示;当空间像素位于每个平面中心位置时,如图 1(c) 所示;当空间像素位于立方体中心位置时,如图 1(d) 所示。式中 p 为与第 i 个空间像素相邻的像素集合总数,依此得到 $N \times N$ 维正则矩阵 $D^T D$,其中 N 为空间像素的总数。

3 无噪声测量信号的温度场重建

在本部分,采用数值模拟来验证动态重建算法的可行性,重建质量与 LSM、ART 和标准 Tikhonov 正则化方法比较。选择 $12\text{ m} \times 12\text{ m} \times 12\text{ m}$ 的正方体空间区域,将 20 只声学传感器分别布置在 3 个不同平面,如图 2 所示,共有 58 条独立声波声线路径。将整个图像重建区域划分为 $3 \times 3 \times 3 = 27$ 个子区域,在得到各子区域温度后,再进行 $31 \times 31 \times 31$ 的双三次样条插值。本文仿真实验在 Intel(R) i7-7500、2.9 GHz CPU、8 G 内存的计算机上进行,开发工具为 MATLAB2016a。

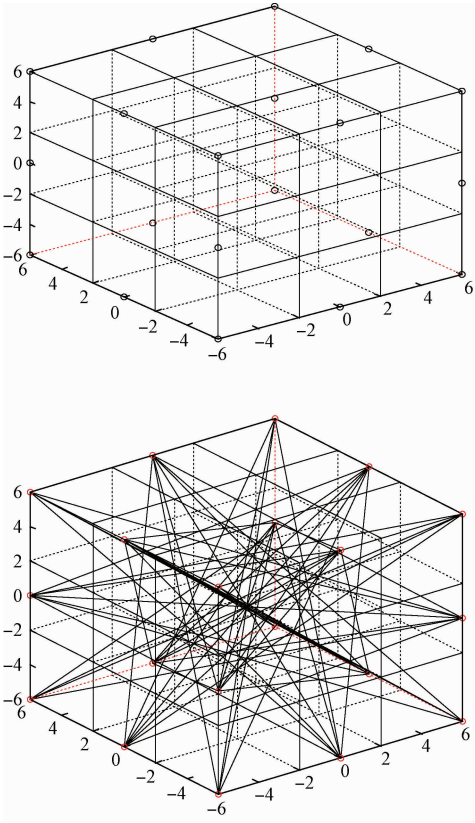


图 2 声学传感器的布置及声波射线
Fig.2 The arrangement of acoustic transducer and the acoustic rays

本文选择了 4 种典型的温度场分布进行模拟,分别是单峰对称、单峰偏斜、双峰对称和四峰对称温度场,模型温度场分布如图 3(a) ~ (d) 所示。

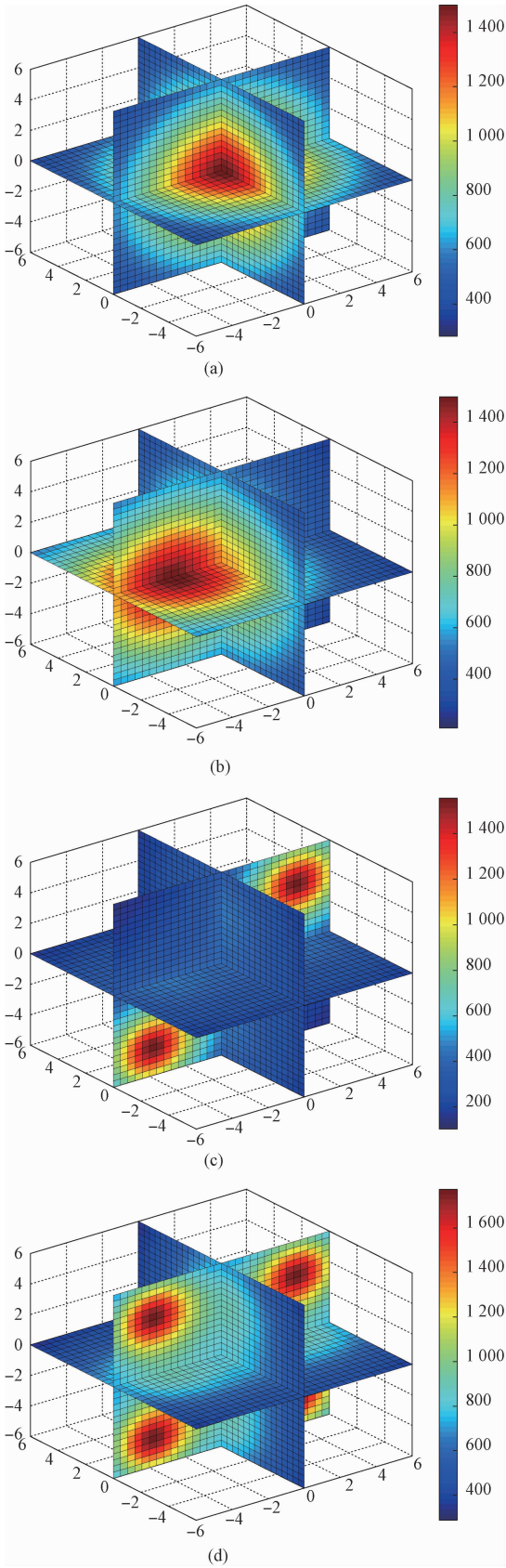


图 3 模型温度场分布
Fig.3 Temperature field distribution of model

其中的单峰对称模型温度场函数为：

$$T = \frac{1\,500}{0.04(x^2 + y^2 + z^2) + 1}$$

(20)

单峰偏斜温度场函数为：

$$T = \frac{1\,500}{0.04((x + 3)^2 + y^2 + z^2) + 1}$$

(21)

双峰对称模型温度场函数为：

$$T = \frac{1\,500}{0.2((x - 4)^2 + y^2 + (z - 4)^2) + 1} + \frac{1\,500}{0.2((x + 4)^2 + y^2 + (z + 4)^2) + 1}$$

(22)

四峰温度场对称模型温度场函数为：

$$T = \frac{1\,500}{0.2((x + 4)^2 + y^2 + (z + 4)^2) + 1} + \frac{1\,500}{0.2((x + 4)^2 + y^2 + (z - 4)^2) + 1} + \frac{1\,500}{0.2((x - 4)^2 + y^2 + (z + 4)^2) + 1} + \frac{1\,500}{0.2((x - 4)^2 + y^2 + (z - 4)^2) + 1}$$

(23)

动态重建算法重建温度场的结果如图 4 所示。标准 Tikhonov 正则化算法 (standard tikhonov reconstruction, STR) 的正则化参数选择为 0.000 01。ART 算法的参数

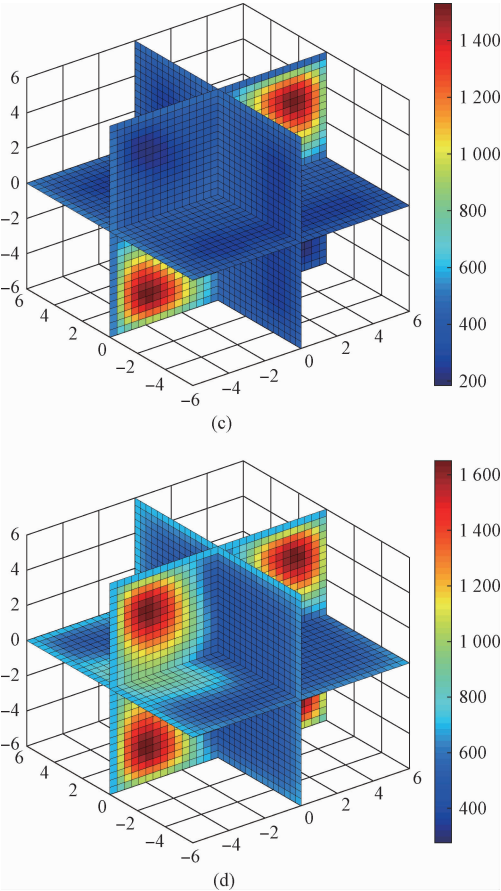


图 4 动态重建算法重建的温度场图像
Fig. 4 Reconstructed temperature field by dynamic reconstruction algorithm

选择如表 1 所示,迭代终止准则采用最后 2 次迭代结果差的范数小于 10^{-3} 。温度场重建结果表明,4 种算法都能重建出符合模型温度场的图像。

表 1 ART 迭代法的参数选择
Table 1 Parameters selection of ART algorithm

参数	单峰对称	单峰偏斜	双峰对称	四峰对称
松弛系数	0.24	0.22	0.20	0.20
迭代步数	120	120	120	120

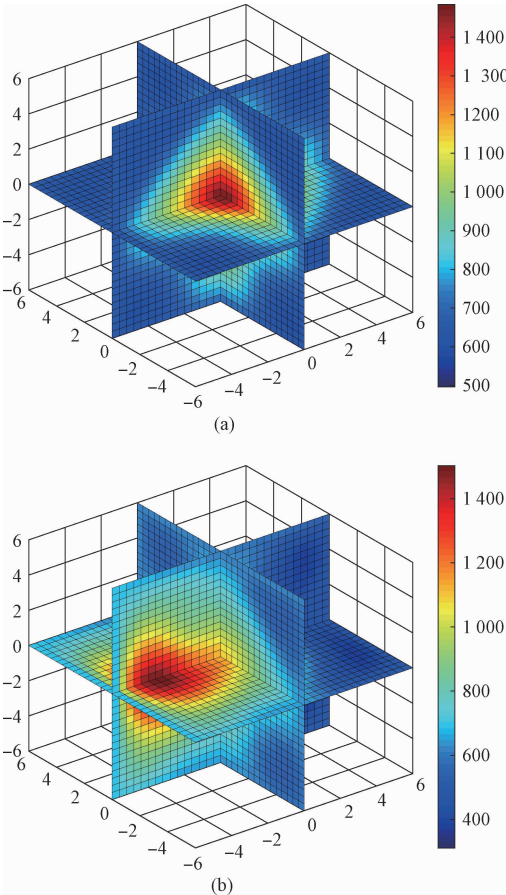
采用最大相对误差 E_1 、平均相对误差 E_2 、均方根误差 E_3 对 3 种算法重建温度场的精度进行评价。最大相对误差、相对平均误差和均方根误差的定义如式 (24) ~ (26) 所示。

$$E_1 = \frac{|T_{Mmax} - T_{Rmax}|}{T_{Mmax}} \times 100\%$$

(24)

$$E_2 = \frac{|T_{Ma} - T_{Ra}|}{T_{Ma}} \times 100\%$$

(25)



$$E_3 = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [T_M(j) - T_R(j)]^2}}{T_{M_{\max}}} \times 100\%$$

(26)

式中: N 为重建温度场像素数, $T_M(j)$ 为模型温度场的像素温度值, T_{Ma} 为模型温度场平均温度, $T_{M_{\max}}$ 为模型温度场的最高温度; $T_R(j)$ 是重建温度场的像素温度值, T_{Ra} 为重建温度场平均温度, $T_{R_{\max}}$ 为重建温度场的最高温度。

4 种方法的重建结果的误差如表 2 所示,最小二乘法的重建结果与标准 Tikhonov 正则化的结果比较接近,这是因为 Tikhonov 正则化方法对于超定问题的改进效果很有限。ART 方法的重建结果比最小二乘和标准 Tikhonov 正则化算法的重建精度略高,而基于动态重建算法的温度场重建结果有了明显改善。以单峰对称温度场的重建为例,最小二乘法的重建时间是 0.021 s,ART 法的重建时间是 0.039 s,标准 Tikhonov 正则化方法的重建时间是 0.025 s,而动态重建算法的重建时间是 0.032 s。4 种算法的重建时间相仿,但是动态重建算法的各项误差最小。

表 2 重建结果误差分析

Table 2 Errors analysis of reconstruction result

算法	模型	最大误差	平均误差	均方根误差
LSM	单峰对称	1.02	3.30	1.88
	单峰偏斜	7.21	2.45	6.67
	双峰对称	11.26	6.82	9.86
	四峰对称	26.05	11.53	10.37
ART	单峰对称	1.02	3.30	1.88
	单峰偏斜	1.41	2.02	5.52
	双峰对称	7.83	6.23	9.74
	四峰对称	16.04	10.68	10.34
标准 Tikhonov 正则化法	单峰对称	1.02	3.30	1.88
	单峰偏斜	7.23	2.53	6.69
	双峰对称	12.37	5.36	9.87
	四峰对称	26.37	11.50	10.38
动态重 建算法	单峰对称	0.58	0.96	0.52
	单峰偏斜	2.28	1.28	0.63
	双峰对称	5.98	3.84	2.14
	四峰对称	9.25	6.79	4.87

本文对动态重建算法精度随声波路线数量的变化和收敛情况进行了分析。分别选取 22 只传感器(72 条声波路线)、21 只传感器(65 条声波路线)、19 只传感器(51 条声波路线)、18 只传感器(45 条声波路线)、17 只传感器(38 条声波路线)5 种不同的声波路线情况进行分析。模拟结果显示,对于 72 条、65 条、51 和 45 条声波路线的情况下,算法都收敛,而精度随着声波路线的数量减少而降低。当声波路线数量减少到 38 条时,法方程系数阵的条件数为 4×10^{16} ,病态性严重,算法不能收敛到有效解。

4 含噪声测量信号的温度场重建

声学温度场重建是一个具有不适定性的病态逆问题,最终解对测量噪声非常敏感,一个好的算法要具有对带有噪声的 TOF 数据的稳定性。在本部分,采用带有噪声的 TOF 数据来验证动态重建算法的稳定性。本文分别在模拟 TOF 值加入均值为 0,标准差分别为 0.02、0.04、0.06、0.08 和 0.10 倍测量信号的随机噪声,观察 4 种算法对测量噪声的鲁棒性。4 种算法重建温度场的均方根误差比较结果如图 5 所示。以单峰对称模型温度场为例,LSM 法在 5 种不同测量噪声条件下,重建温度场的均方根误差分别为 3.89、5.09、7.90、10.12 和 13.34,

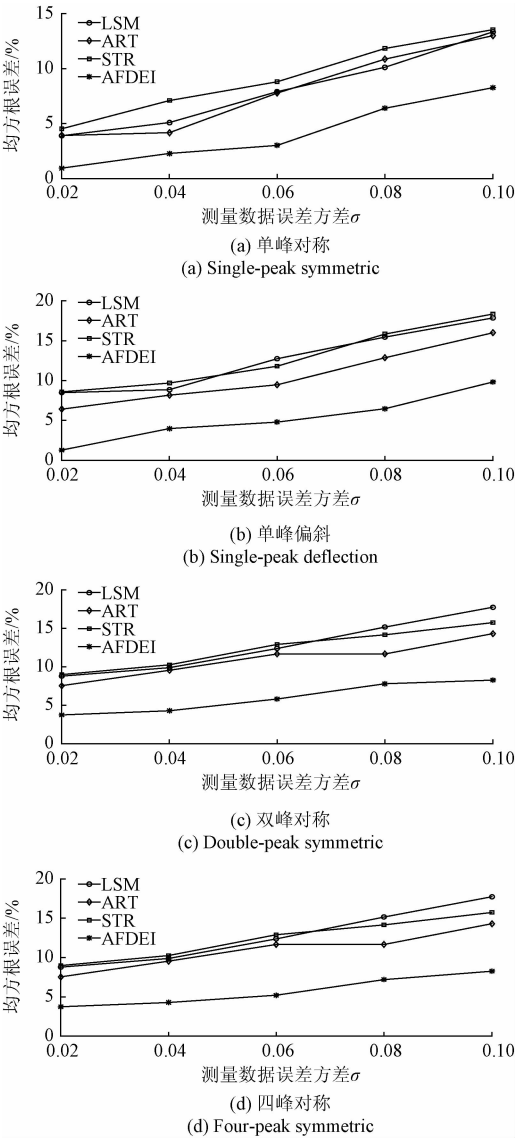


图 5 测量噪声对均方根误差的影响
Fig. 5 The influence of measurement noise on mean root square error

ART 方法重建温度场的均方根误差分别为 3.91、4.17、7.77、10.86 和 12.99, 标准 Tikhonov 算法重建温度场的均方根误差分别为 4.52、7.09、8.80、11.83 和 13.54, 而动态重建算法重建温度场的均方根误差分别为 0.94、2.28、5.61、6.39 和 8.26。均方根误差都随着模型温度场分布复杂性的增加而增加。由此可知, 不同的重建算法都有一定的抗噪能力, 其中 LSM、ART 和 Tikhonov 正则化方法的抗噪能力比较接近, 而加入了动态演变信息的动态重建算法与前面 3 种算法相比, 对于测量噪声的抗噪能力增强, 尤其是在复杂温度场模型的情况下具有很好的数值稳定性。

5 结 论

近年来, 声学 CT 重建温度场的研究日益深入, 该技术可在线测量温度场分布, 具有成本低、速度快、非侵入等优点, 而温度场重建算法是声学 CT 温度场重建的关键, 直接影响着重建的精度和重建技术的实用性。为了寻找更优的温度场重建算法, 使得声学技术可以更加精确地重建温度场分布, 本文提出采用动态重建方法重建三维温度场分布。利用声学数据和动态重建方法对 4 种典型温度场进行了重建仿真, 并对测量数据误差对重建精度的影响做了研究, 仿真数据重建结果表明, 与 LSM、ART 和 Tikhonov 正则化算法相比, 动态重建算法的重建速度相仿, 而重建精度有很大提高。同时对在 TOF 数据中加入随机误差的鲁棒性进行了分析, 结果表明, 动态重建算法具有更好的数值稳定性。今后将进一步完善实验验证并提高算法的适用性。

参考文献

- [1] FUMIO I, MASAYASU S. Fundamental studies of acoustic measurement and reconstruction combustion temperature in large boilers [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1985, 53(489): 1610-1614.
- [2] LU J, WAKAI K, TAKAHASHI S. Acoustic computer tomographic pyrometry for two-dimensional measurement of gases taking into account the effect of refraction of sound wave paths [J]. Measurement Science & Technology, 2000, 11(6): 692-697.
- [3] 安连锁, 宋志强, 姜根山, 等. 考虑声波折射的声学锅炉温度场测量技术的研究 [J]. 动力工程, 2005, 25(3): 378-381.
AN L S, SONG ZH Q, JIANG G SH, et al. A sonic measuring technique of furnace temperature fields taking into account the refraction of sound waves [J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2005, 25(3): 378-381.
- [4] BRAMANTI M, EMANUELE A, SALERNO A, et al. An acoustic pyrometer system for tomographic thermal imaging in power plant boilers [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(1): 159-167.
- [5] 田丰, 孙小平, 邵富群, 等. 基于高斯函数与正则化法的复杂温度场图像重建算法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 212-220.
TIAN F, SUN X P, SHAO F Q, et al. A study of complex temperature field reconstruction algorithm based on combination of Gaussian functions with regularization method [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 212-220.
- [6] 沈国清, 安连锁, 姜根山, 等. 基于声学 CT 重建炉膛二维温度场的仿真研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 11-14.
SHEN G Q, AN L S, JIANG G SH, et al. Simulation of two-dimensional temperature field in furnace based on acoustic computer tomography [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 11-14.
- [7] 颜华, 王善辉, 周英钢. 正则化参数自适应选取的声学 CT 温度场重建 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 103-109.
YAN H, WANG SH H, ZHO Y G. Acoustic CT temperature field reconstruction based on adaptive regularization parameter selection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(6): 103-109.
- [8] 安连锁, 李庚生, 沈国清, 等. 声学测温系统在 200 MW 电站锅炉中的应用研究 [J]. 动力工程学报, 2011, 31(12): 928-932.
AN L S, LI G SH, SHEN G Q, et al. Application of acoustic pyrometer in a 200 MW power plant boiler [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(12): 928-932.
- [9] YAN H, LI K, WANG S H. A 3D acoustic temperature field reconstruction algorithm based on Tikhonov regularization [C]. Advances in Intelligent and Soft Computing, 2012, 168(1): 365-370.
- [10] 颜华, 崔柯鑫, 续颖. 基于少量声波飞行时间数据的温度场重建 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 470-475.
YAN H, CUI K X, XU Y. Temperature field reconstruction based on a few sound travel-time data [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2): 470-475.
- [11] 谢李兵, 刘彤, 张志刚, 等. 基于迭代和插值算法的二维温度场重建 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 249-252.
XIE L B, LIU T, ZHANG ZH G, et al. The 2-D

- temperature reconstruction based on the algorithm of interpolation and iterative[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 249-252.
- [12] 田丰, 刘再胜, 孙小平, 等. 基于 RBF 神经网络的温度场重建算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(11): 1460-1464.
- TIAN F, LIU Z SH, SUN X P, et al. Temperature field reconstruction algorithm based on RBF neural network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(11): 1460-1464.
- [13] 阚哲, 孟国营, 王晓蕾, 等. 基于遗传算法的炉膛温度场重建算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10): 1149-1154.
- KAN ZH, MENG G Y, WANG X L, et al. Research of boiler temperature field reconstruction algorithm based on genetic algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(10): 1149-1154.
- [14] 王然, 安连锁, 沈国清, 等. 基于奇异值分解的炉膛三维温度场声学重建仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2014(z1): 147-152.
- WANG R, AN L S, SHEN G Q, et al. Research on simulation of furnace three-dimensional temperature field reconstruction by acoustics based on singular value decomposition [J]. Proceedings of the CSEE, 2014(z1): 147-152.
- [15] 安连锁, 王然, 沈国清, 等. 基于迭代算法的炉膛三维温度场声学重建[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2015, 42(1): 69-73.
- AN L S, WANG R, SHEN G Q, et al. Research on reconstruction of three-dimensional temperature field in furnace by acoustics based on iterative algorithm[J]. Journal of North China Electric Power University, 2015, 42(1): 69-73.
- [16] 周献, 王强, 缪志农, 等. 基于 RBF 神经网络的三维温度场重建算法[J]. 仪表技术与传感器, 2013(5): 99-102.
- ZHOU X, WANG Q, MIAO ZH N, et al. Three-dimensional temperature field reconstruction algorithm based on RBF neural network[J]. Instrument Technique and Sensor, 2013(5): 99-102.
- [17] 安连锁, 王然, 沈国清, 等. 声学 CT 算法重建炉内三维温度场的仿真研究[J]. 动力工程学报, 2015, 35(1): 13-18.
- AN L S, WANG R, SHEN G Q, et al. Simulation study on reconstruction of 3D temperature field in boiler furnace by acoustic CT algorithm[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(1): 13-18.
- [18] 王然, 安连锁, 沈国清, 等. 基于正则化 SVD 算法的三维温度场声学重建[J]. 计算物理, 2015, 32(2): 195-201.
- WANG R, AN L S, SHEN G Q, et al. Three-dimensional temperature field reconstruction with acoustics based on regularized SVD algorithm [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2015, 32(2): 195-201.
- [19] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀琴. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001: 186-188.
- DU G H, ZHU Z M, GONG X Q. Fundamental of Acoustic [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2001: 186-188.
- [20] BUTALA M D, HEWETT R J, FRAZIN R A, et al. Dynamic three-dimensional tomography of the solar corona[J]. Solar Physics, 2010, 262(2): 495-509.
- [21] BELGE M, KILMER M E, MILLER E L. Simultaneous multiple regularization parameter selection by means of the L-hypersurface with applications to linear inverse problems posed in the wavelet domain [C]. SPIE, 1998: 1-9.
- [22] BRLGE M, KILMER M E, MILLER E L. Efficient determination of multiple regularization parameters in a fgeneralized L-curve framework[J]. Inverse Problems, 2002(18): 1161-1183.

作者简介



李艳秋, 1969 年出生, 现为华北电力大学讲师、博士研究生, 主要研究方向是声学法温度场检测技术、燃烧优化方法。

E-mail: lyq8@ncepu.edu.cn

Li Yanqiu was born in 1969, lecturer and Ph. D. candidate in North China Electricity Power University. Her present research interests include temperature field measurement technique by acoustic, and combustion optimization method.



刘石, 1956 年出生。1995 年于英国剑桥大学获得博士学位, 现为华北电力大学教授。主要研究方向为可再生能源系统的燃烧与检测方法、过程层析成像与可视化测量方法。

E-mail: liushi_ncepu@yahoo.com.cn

Liu Shi was born in 1956, received Ph. D. from University of Cambridge, UK, in 1995. He is a professor at North China Electricity Power University now. His main research field is combustion and measurement method of renewable energy resources, process tomography and visualization.