

基于声学与光学相联合的温度场重建技术 数值模拟研究

黄帆¹, 刘石¹, 宋伟¹, 刘博阳²

(1. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院 北京 102206; 2. 华能玉环电厂 浙江 玉环 317600)

摘要: 为了获得较为精确的炉膛燃烧二维温度场, 达到实时监测炉膛内火焰温度的目的, 分别利用光学法与声学法建立温度场重建模型并推导出较为简便的矩阵反演公式, 并结合 SVD(奇异值分解)算法对炉膛内二维温度场进行重建。数值研究表明: 在测量误差均为 0.05 和 0.1 时, 光学与声学测量方法分别在高温区域与低温区域有较好的重建效果。据此提出了基于层次分析法的声、光联合温度场重建技术, 当采用(声、光)联合技术对炉膛单峰对称、单峰偏置和双峰对称温度场进行二维重建时, 反演精度较光学法或声学法均提高 0.01 左右, 表明了此种融合方法的可行性和准确性, 对炉膛温度场反演具有重要意义。

关键词: 炉膛火焰二维温度场; 指数 SVD 算法; 层次分析法; 声光联合

中图分类号: TP301.6 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.03.003

引言

对于电站锅炉的燃烧过程而言, 整个过程中包含了许多复杂的物理化学反应, 火焰的温度场分布和燃烧状态直接关系到电站的安全和燃烧诊断。锅炉燃烧的基本要求是炉膛内建立并维持稳定、均匀的燃烧火焰^[1]。而燃烧过程的稳定性直接体现在炉膛内燃烧火焰的分布情况。传统测温工具如热电偶、热电阻、气体取样探针等由于其自身具有破坏温度场、反应迟缓和只能进行单点测量等缺点而逐渐被淘汰。可视化燃烧检测, 即通过获取到的火焰图像结合相对成熟的数学及计算机技术得出温度场分布的方法在近些年被广泛重视。

现阶段, 锅炉火焰燃烧温度重建技术主要基于声学和光学两种方法。声学和光学方法分别是基于

声波在不同温度下传播速度不同的原理以及不同温度具有不同辐射波长的原理来进行温度场重建。但由于在测量过程中受到器件、人为测量误差等因素的影响, 采用其单一测量方法会使反演的温度场误差较大。

本研究首先分别利用声学和光学两种方法反演炉膛火焰二维温度场, 通过分析比较两种方法所获得温度场及误差分布图像找出温度测量融合点, 提出声、光联合温度场重建技术。

1 测温模型建立

研究对象为 1 个 10 m × 10 m 的二维矩形封闭系统, 系统发射率(吸收率)为 0.8。系统中充满具有吸收系数为 0.2 m⁻¹, 散射系数为 0.1 m⁻¹ 的灰性发射、吸收及散射气体。系统中的气体区域被平均划分成 10 × 10 = 100 个网格单元。设定的炉膛空间介质温度分布情况如图 1 所示。所研究的温度场分为 3 个典型工况: 单峰对称、单峰偏置和双峰对称。

为了便于对结果进行比较, 定义重建温度场各气体单元的相对误差为:

$$M(j, k) = \frac{|T(j, k) - \hat{T}(j, k)|}{\hat{T}(j, k)} \quad (1)$$

重建区域误差利用均方根误差来评价, 其定义为:

$$E = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{j=k=1}^{NM} [T(j, k) - \hat{T}(j, k)]^2} \quad (2)$$

式中: $\hat{T}(j, k)$ — 各个气体单元 (j, k) 的重建温度,

收稿日期: 2015-04-14; 修订日期: 2015-05-21

基金项目: 111 引智(基地编号: B13009) 智能化分布式能源系统创新引智基地

作者简介: 黄帆(1991-), 女, 辽宁本溪人, 华北电力大学研究生。

K ; $T(j, k)$ — 各个气体单元 (j, k) 的设定温度 K ; N — 重建区域重建单元行数; M — 重建区域重建单元列数。

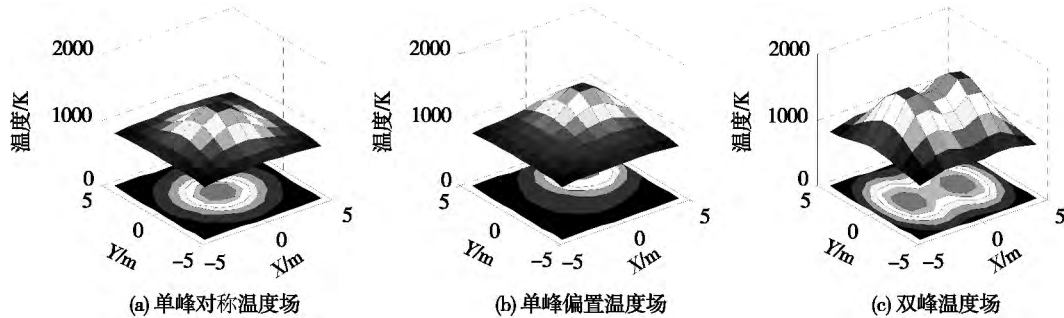


图 1 炉膛空间设定的介质温度分布

Fig. 1 Temperature distribution of the working medium set in the space of the furnace

为了研究测量误差对重建结果的影响,对声波接收器接收的时间及辐射接收装置接收的辐射能均加上随机的测量误差,并设各点测量值的随机误差对其精确值有相同的标准偏差,即:

$$\begin{aligned} F_{i, \text{measured}} &= F_{i, \text{exact}} + \sigma\psi F_{i, \text{exact}} \quad (i = 1, 2, \dots, 24) \\ E_{j, \text{measured}} &= E_{j, \text{exact}} + \sigma\psi E_{j, \text{exact}} \quad (j = 1, 2, \dots, 40) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: σ — 相应测量值的标准偏差与其精确值的比值; ψ — 标准正态分布的随机数。

本研究中声波收发器数量为 8 个即 24 条声波射线,保证同等参数测量误差下与光学的重建误差在同一范围内,使得两种方法比较相对严格。

分别对 $\sigma = 0.05$ 和 $\sigma = 0.1$ 两种测量误差情况针对单峰对称温度场、单峰偏置温度场及双峰对称温度场进行了数值模拟研究。

2 基于声学的温度场反演及误差分析

2.1 正问题模型建立

声学测温法的原理: 声波在气体混合物中的传播速度与气体温度和气体组分有关,而在大多数工程应用中,气体组分和它们的相对含量已知且变化不大,对于炉膛的烟气温度测量,烟气成分变化对温度场测量误差的影响不超过 1.4%^[2]; 故通常认为气体的温度是声速的第一函数^[3],其关系为:

$$C = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}} = Z \sqrt{T} \quad (4)$$

式中: C — 声波在气体介质中的传播速度, m/s ; γ — 气体的绝热指数,与气体成分和状态有关,无量纲量; R — 气体常数, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T — 气体的热力学温度, K ; M — 气体分子量, kg/mol ; 对于给定的气体混合物, $Z = \sqrt{(\gamma \cdot R)/M}$ 为常数,烟道混合气体为 19.08。

若已知声波发射装置和接收装置之间的距离 d ,只需测出声波从发射装置传播到接收装置所需时间 t ,就可以计算得到声波的平均速度 C ,从而利用式(4)得出气体介质平均温度。将炉膛重建区域连续图像离散化并划分为 $N = n \times n$ 的像素点,则有公式为:

$$\sum_{i=1}^N w_{ij} f_j = g_i \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

式中: f_j — 第 j 像素内对应的声速倒数; w_{ij} — 投影系数,反映了第 j 像素对第 i 条射线的贡献,其在数值上等于第 i 条投影射线穿过第 j 像素点的长度; g_i — 第 i 条射线的飞渡时间。

若将上式写成矩阵形式,则有:

$$WF = G \quad (6)$$

式中: G — M 维的投影向量; F — N 维图像向量; W — $M \times N$ 维的投影系数矩阵。

而炉膛内的烟气流速较高,所以当将声学法用于测量炉膛内重建区域时,必须对算法进行相应的修正。本研究采用的修正方法为: 由于声学传感器既可以作为声波发射器又可以作为声波接收器,所以在对炉膛内进行飞渡时间测量时,对于同一条声

波线路,从相反的方向测量两次,对于第 j 个像素点,设其在该条声波线路上的分速度为 v_j ,则该像素点上与 v_j 同方向声波飞渡时间定义为 g_j^1 ,而与 v_j 反方向的声波飞渡时间定义为 g_j^2 。

其中,

$$g_j^1 = \frac{w_{ij}}{c_j + v_j} \tag{7}$$

$$g_j^2 = \frac{w_{ij}}{c_j - v_j}$$

令

$$f_j^1 = \frac{1}{c_j + v_j} \tag{8}$$

$$f_j^2 = \frac{1}{c_j - v_j}$$

于是有:

$$c_j = \frac{1}{\frac{1}{f_j^1} + \frac{1}{f_j^2}} \tag{9}$$

将其写成矩阵形式,则有:

$$WF^1 = G \tag{10}$$

$$WF^2 = G$$

当得出 F^1 和 F^2 时,则:

$$C = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{F^1} + \frac{1}{F^2} \right) \tag{11}$$

再根据气体温度和声速的函数关系得到温度场,这样就避免了烟气流速的影响。

在实际声学测量过程中往往是已知 W 矩阵和 G 矩阵,重建算法的目的就是由 W 矩阵和 G 矩阵求出 F 矩阵,进而重建温度场,而实际过程中由于矩阵 W 往往是病态的,用常规的矩阵理论难以求解,所以要选择适宜的反演算法。本研究对于声学 and 光学反演方法均使用指数 SVD 重建算法进行求解。

2.2 指数 SVD 算法求解

SVD 指的是奇异值分解的方法^[4]。它的具体内容为: 对一个实矩阵 $A \in R^{m \times n}$, 必然存在正交矩阵:

$$U = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ \dots \ u_m] \in R^{m \times m}$$

$$V = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ \dots \ v_n] \in R^{n \times n}$$

使得:

$$A = USV^T \tag{12}$$

当 $m < n$ 时,

$$S = [\text{diag}(\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3 \ \sigma_4 \ \dots \ \sigma_m) \ 0];$$

当 $m > n$ 时,

$$S = [0 \ \text{diag}(\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3 \ \sigma_4 \ \dots \ \sigma_n)]。$$

故对 A 进行 SVD 分解后, A 的伪逆即为:

$$A^+ = V \begin{bmatrix} \Sigma^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} U^T \tag{13}$$

其中,当 $m < n$ 时, $\Sigma^{-1} = \text{diag}(1/\sigma_1, 1/\sigma_2, 1/\sigma_3, \dots, 1/\sigma_m)$;

当 $m > n$ 时, $\Sigma^{-1} = \text{diag}(1/\sigma_1, 1/\sigma_2, 1/\sigma_3, \dots, 1/\sigma_n)$ 。

在炉膛重建过程中,将速度倒数函数 $f(x, y)$ 分成有限项指数基函数的线性组合^[5]。基函数的选取是先在温度场中选取了一部分典型的点,由这些点生成基函数,具体表示为:

$$f(x, y) = \sum_{m=1}^{N_d} (\varepsilon_m \alpha_m(x, y)) \tag{14}$$

$$\alpha_m = e^{-\theta \sqrt{(x-x_m)^2 + (y-y_m)^2}} \tag{15}$$

式中: N_d —所取基函数的个数; ε_m —待定的系数,表示每个基函数对函数的影响大小; x_m, y_m —所取的第 m 个基函数对应取的点的坐标。

分解后,式(5)可以表示为:

$$\sum_{i=1}^N w_{ij} \sum_{k=1}^{N_d} \varepsilon_k \alpha_k(x_j, y_j) = g_i, \quad j = 1, 2, \dots, M \tag{16}$$

表示成矩阵的形式有:

$$G = WAE \tag{17}$$

式中: W — $M \times N$ 维的投影系数矩阵; A — $N \times N_d$ 维矩阵; E — N_d 维行向量。

将 WA 看成一个整体,利用 SVD 方法对其求伪逆,由式(14)和式(17)分别得出 E 和 $f(x, y)$,进而完成对温度场的重建。

指数 SVD 重建效果的好坏取决于基函数形式、个数及其基函数 (x_m, y_m) 位置点的选择,本研究位置点选取方式是以温度场中心为圆心从内向外分别取半径为 1、2、...、10 m 的 10 个同心圆,每个圆周上均匀取 10 个点,与矩阵中心点合计 101 个点,这样的取点方式简单且重建效果满足精度要求。

对于光学,由于其矩阵形式和声学相同,也能采取同样的方式重建出温度分布。

2.3 重建结果及分析

在 $\sigma = 0.05$ 和 $\sigma = 0.1$ 情况下基于声学法重建的温度分布及相对误差分布如图 2~图 5 所示。

从图 2~图 5 可以看出,在测量误差分别为 0.05 及 0.1 时,重建的温度场仍能呈现初始温度场

的分布形状。但随着误差的增大, 峰值区域开始出现明显的温度波动, 而低温区域仍可以保持良好的重建效果。

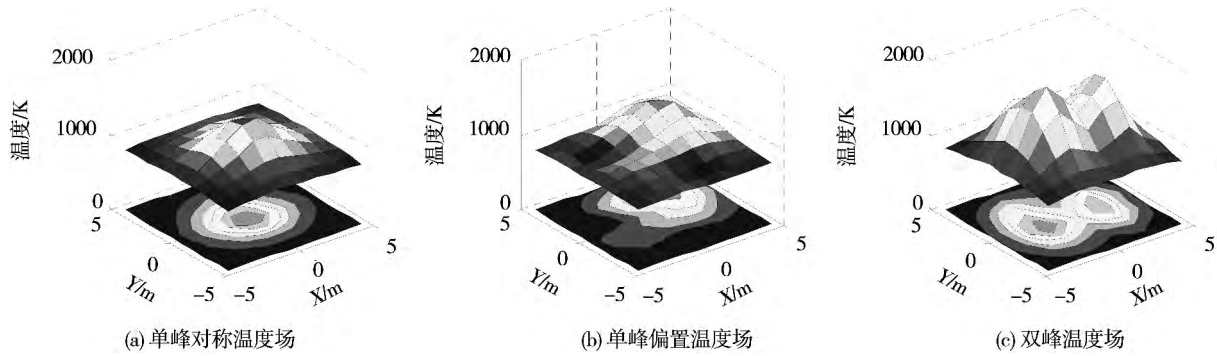


图 2 $\sigma = 0.05$ 时重建的温度场

Fig. 2 Temperature field rebuilt when $\sigma = 0.05$

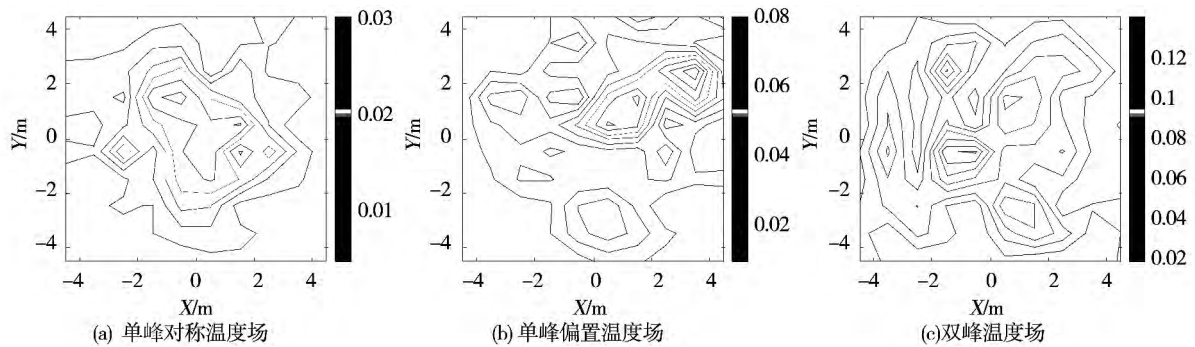


图 3 $\sigma = 0.05$ 时误差分布

Fig. 3 Error distribution when $\sigma = 0.05$

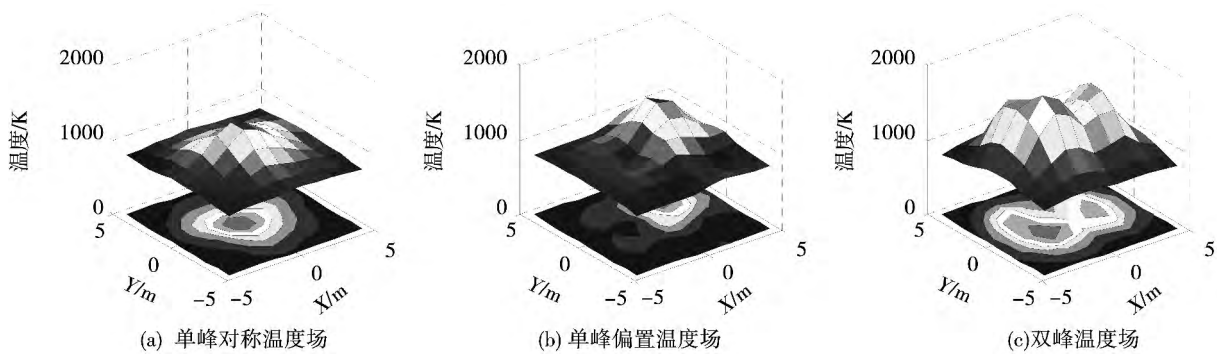


图 4 $\sigma = 0.1$ 时重建的温度场

Fig. 4 Temperature field rebuilt when $\sigma = 0.1$

4 基于光学的温度场反演及误差分析

4.1 正问题模型建立

辐射传递方程可以写成如下的通用形式^[6]:

$$\frac{dI_\lambda}{ds} = -(K_{\alpha\lambda} + \sigma_{s\lambda}) I_\lambda + K_{\alpha\lambda} I_{b\lambda} + \frac{\sigma_{s\lambda}}{\Delta\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(S') \phi_\lambda(S'S) d\Omega \quad (18)$$

式中: $\kappa_{\alpha\lambda}$ —吸收系数; $\sigma_{s\lambda}$ —散射系数;

$I_{\lambda}(s)$ —光谱散射方向强度, W/m^3 ; $\varphi_{\lambda}(S', S)$ —光谱散射相函数。

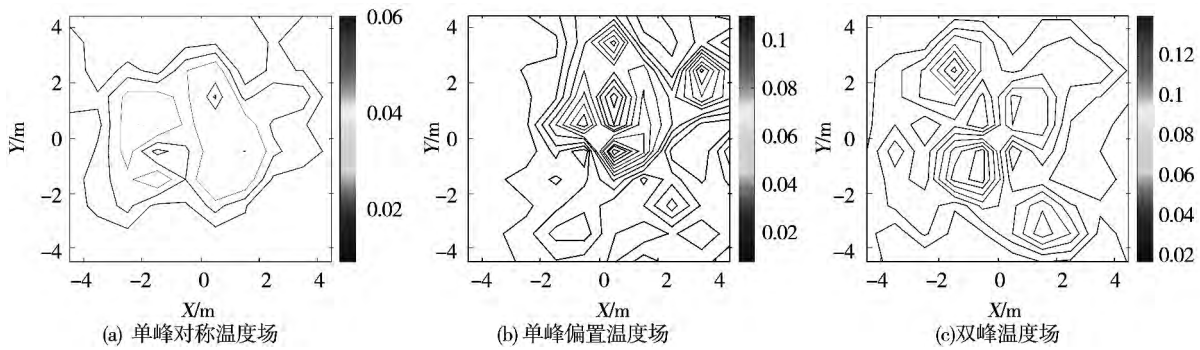


图 5 $\sigma = 0.1$ 时误差分布

Fig. 5 Error distribution when $\sigma = 0.1$

考虑一个由灰色固体壁面及所包围的灰色气体所组成的二维封闭系统,将气体和壁面区域分别离散成 m 和 n 个单元,其相应的能量方程由式(19)和式(20)给出^[7]:

$$4K_{g_i}\sigma T_{g_i}^4 \Delta V_{g_i} + C_{p_i} G_{out_i} T_{g_i} = \sum_{g_j=1}^m R_d(g_j \rightarrow g_i) 4K_{g_j}\sigma T_{g_j}^4 \Delta V_{g_j} + \sum_{w_j=1}^n R_d(w_j \rightarrow g_i) \varepsilon_{w_j} \sigma T_{w_j}^4 \Delta S_{w_j} + C_{p_{\mu p_i}} G_{in_i} T_{g_{\mu p_i}} + Q_{g_i} \Delta V_{g_i} \quad (19)$$

$$\varepsilon_{w_i} \sigma T_{w_i}^4 \Delta S_{w_i} + Q_{w_i} \Delta S_{w_i} = \sum_{g_j=1}^m R_d(g_j \rightarrow w_i) 4K_{g_j}\sigma T_{g_j}^4 \Delta V_{g_j} + \sum_{w_j=1}^n R_d(w_j \rightarrow w_i) \varepsilon_{w_j} \sigma T_{w_j}^4 \Delta S_{w_j} \quad (20)$$

式中: C_p —气体比热, $J/(kg \cdot K)$; G —质量流速, kg/s ; κ_a —吸收系数, $1/m$; ΔS —壁面单元面积, m^2 ; ΔV —气体单元体积, m^3 ; ε —壁面发射率; σ —玻尔兹曼常数, $W/(K^4 \cdot m^2)$ 。

方程左边项代表每个单元流出的能量,而右边代表流入的能量。 $R_d(g_j \rightarrow g_i)$ 称为 READ 数,它是 g_j 辐射出的被 g_i 吸收的部分与 g_j 辐射出的总能的比值。 R_d 数仅仅取决于系统的几何结构和辐射特性参数分布,而与系统温度分布无关。这些 R_d 数是采用 MCM(蒙特卡洛法)对灰性气体和灰性固体壁面所组成的辐射-吸收系统进行求解而得到的^[8]。

为了获取边界上的辐射强度信息,在壁面的各个离散单元上安装光敏探头等辐射能接收装置,每个壁面单元接收到的辐射能是空间各部分气体单元

和壁面单元所发射辐射能在经历了一系列的吸收、反射、散射等过程后最终到达该壁面单元的辐射能的叠加。则对于第 k 个壁面单元所接收的辐射能,其数学式表达为:

$$E(k) = \sum_{i=1}^m R_d_g(i \rightarrow k) 4K_{g_i}\sigma T_{g_i}^4 \Delta V_{g_i} + \sum_{j=1}^n R_d_w(j \rightarrow k) \varepsilon_{w_j} \sigma T_{w_j}^4 \Delta S_{w_j} \quad (21)$$

在实际锅炉中,由于炉壁四周水冷壁的冷却作用,相比于炉膛内的高温气体,炉壁温度较低,而辐射能与温度的 4 次方成正比,因此可以忽略壁面辐射的影响,则式(21)可以简化为:

$$E(k) = \sum_{i=1}^m R_d_g(i \rightarrow k) 4K_{g_i}\sigma T_{g_i}^4 \Delta V_{g_i} \quad (22)$$

矩阵形式表示为:

$$E = U \cdot T_g \quad (23)$$

式中: $E \in R^{n \times 1}$ — n 个壁面单元辐射接收装置各自所接收的辐射能组成的集合。

$U \in R^{n \times m}$ 被称为敏感矩阵:

$$U(k, i) = R_d_g(i \rightarrow k) 4K_{g_i}\sigma \Delta V_{g_i} (i = 1, \dots, m) \quad (24)$$

敏感矩阵与第 i 个气体单元发出的辐射能被第 k 个壁面单元接收到的份额成正比。定义 $T_g(k, i) \in R^{m \times 1}$ 表示空间气体单元温度的 4 次方,即: $T_g(k, i) = T_{g_i}^4 (i = 1, \dots, m)$ 。

在本研究的问题模型中,以待求温度的 4 次方作为自变量,代表了炉内辐射能量水平,与边界辐射接收装置接收到的辐射能之间必然存在一种线性关

系。这种能量的线性关系为温度场的重建求解奠定了良好的基础。

3.2 重建结果及分析

针对所建立的模型: 系统发射率(吸收率)为 0.8, 气体吸收系数为 0.2 m^{-1} , 散射系数为 0.1 m^{-1} 。首先采用 MCM 计算 READ 数, 从每个气体单

元发射的能束数为 10 000 000, 确定每条光束的发射位置及方向, 跟踪每条光束, 以获得稳定的 READ 数。然后利用 2.2 中介绍的指数 SVD 算法反演温度场。

在 $\sigma = 0.05$ 和 $\sigma = 0.1$ 情况下基于光学法重建的温度分布及相对误差分布如图 6 ~ 图 9 所示。

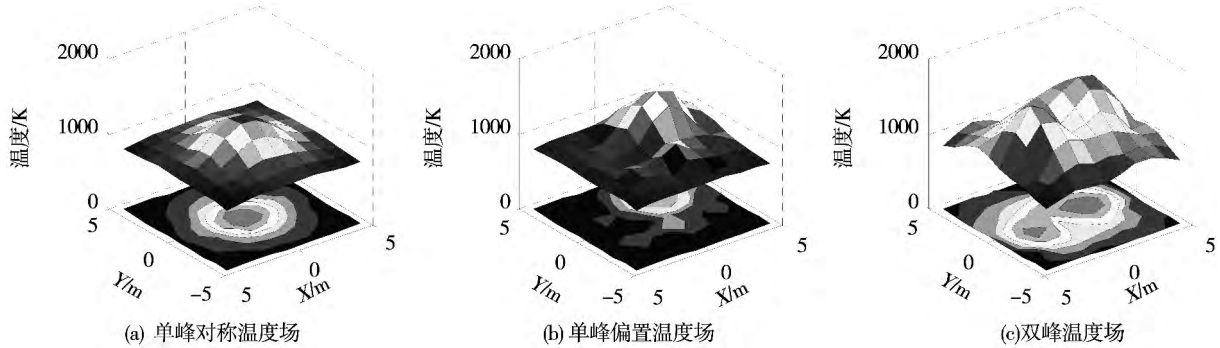


图 6 $\sigma = 0.05$ 时重建温度场

Fig. 6 Temperature field rebuilt when $\sigma = 0.05$

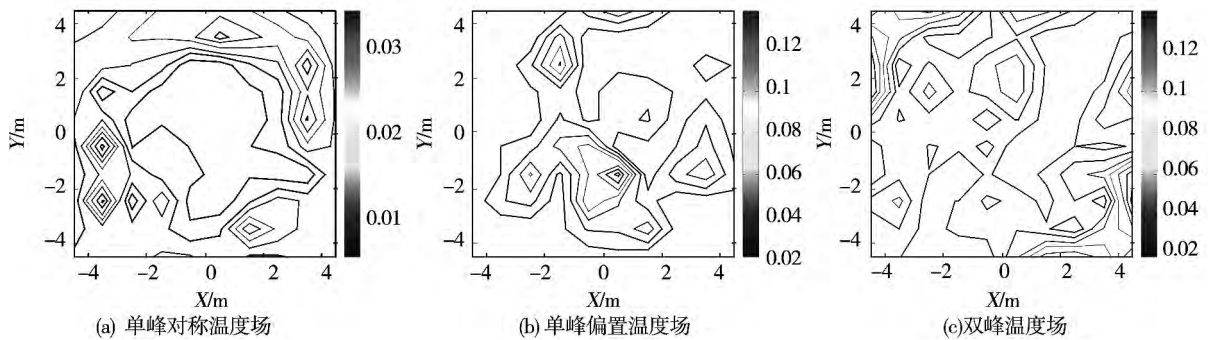


图 7 $\sigma = 0.05$ 时误差分布图

Fig. 7 Chart showing the error distribution when $\sigma = 0.05$

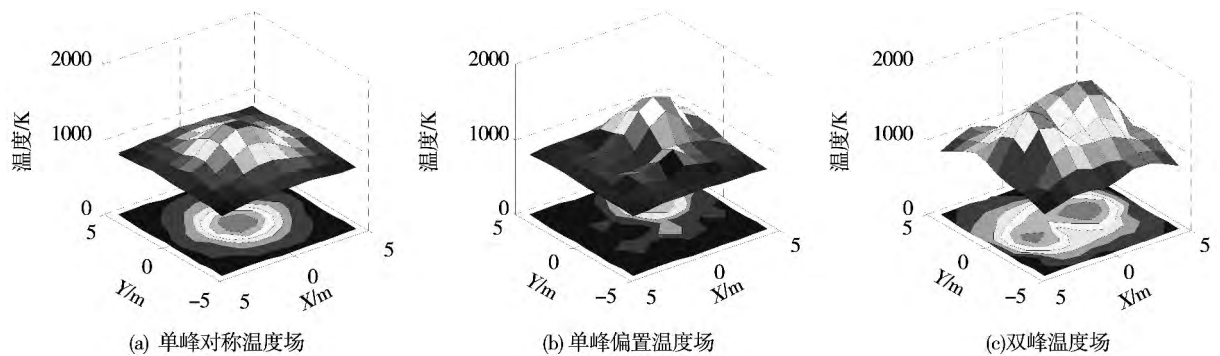


图 8 $\sigma = 0.1$ 时重建温度场

Fig. 8 Temperature field rebuilt when $\sigma = 0.1$

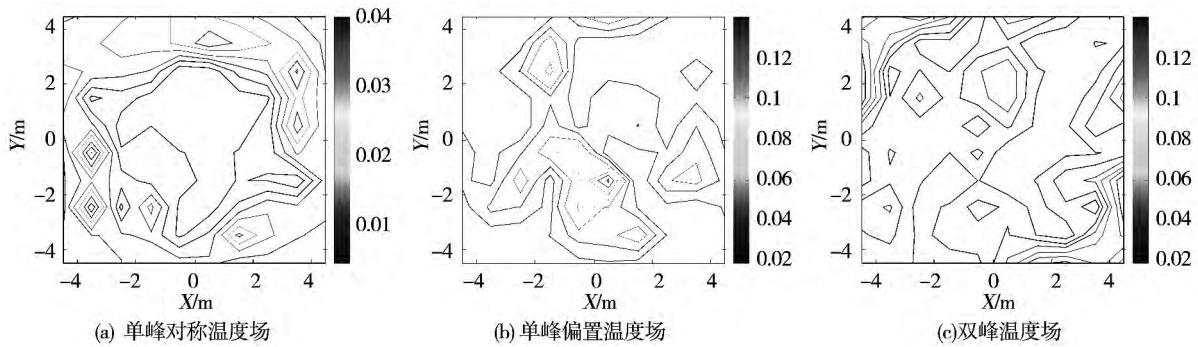


图 9 $\sigma = 0.1$ 时误差分布图

Fig 9 Chart showing the error distribution when $\sigma = 0.1$

表 1 $\sigma = 0.05$ 和 $\sigma = 0.1$ 时误差对比

Tab. 1 Contrast of the errors obtained when $\sigma = 0.05$ and $\sigma = 0.1$

温度场		σ	声学法	光学法	联合
单峰对称	高温区域	$\sigma = 0.05$	2.23%	0.43%	0.43%
		$\sigma = 0.1$	3.48%	0.48%	0.48%
	低温区域	$\sigma = 0.05$	0.63%	1.70%	0.63%
		$\sigma = 0.1$	1.07%	1.91%	1.07%
	整体	$\sigma = 0.05$	1.41%	1.41%	0.58%
		$\sigma = 0.1$	2.23%	1.58%	0.91%
单峰偏置	高温区域	$\sigma = 0.05$	4.79%	2.22%	2.22%
		$\sigma = 0.1$	5.01%	2.15%	2.15%
	低温区域	$\sigma = 0.05$	1.73%	4.13%	1.73%
		$\sigma = 0.1$	2.69%	4.29%	2.69%
	整体	$\sigma = 0.05$	2.99%	3.70%	1.90%
		$\sigma = 0.1$	3.55%	3.81%	2.56%
双峰	高温区域	$\sigma = 0.05$	6.34%	3.31%	3.31%
		$\sigma = 0.1$	7.07%	3.33%	3.33%
	低温区域	$\sigma = 0.05$	1.33%	7.65%	1.33%
		$\sigma = 0.1$	1.81%	7.97%	1.81%
	整体	$\sigma = 0.05$	5.63%	4.82%	3.00%
		$\sigma = 0.1$	6.31%	4.96%	3.08%

从图 6 ~ 图 9 可以看出,在不同的误差情况下,重建的温度场仍能呈现原始场的分布形状。随着测量误差的增大,气体区域温度重建结果开始出现波动,但整体分布规律并未改变,说明重建效果还是良好的。比较同等误差条件下的误差分布图像,高温区域的重建效果好于低温区域。

4 基于层次分析法的声光联合

对比声学法、光学法重建结果发现,两种方法在温度场重建上优劣明显,声学法适宜于低温区域的温度场重建而光学法适宜于高温区域的温度场重建,据此本研究利用层次分析法进行声光联合仿真: T_H 表示温度场 T 的高温区域, T_L 表示温度场 T 的低温区域。高温区域光学重建的权重设为 α_H^o ,声学重建的权重 α_H^a ;低温区域光学重建的权重设为 α_L^o ,声学重建的权重 α_L^a 。则有:

$$T_H = \alpha_H^o T_H^o + \alpha_H^a T_H^a$$

$$T_L = \alpha_L^o T_L^o + \alpha_L^a T_L^a \quad (25)$$

本研究中高、低温区域是以 1 000 K 作为阈值,当温度高于 1 000 K 时定义为高温区域,当温度低于 1 000 K 时定义为低温区域,权重取值如表 2 所示。

表 2 权重分配表

Tab. 2 Table showing the weight distribution

温度场区域	光学法权重	声学法权重
高温区域	1	0
低温区域	0	1

按照表 2 权重选取方法完成高低温区域 T_H 和 T_L 重建后,即能得到最终的重建温度场 T 。

5 对比分析

在单独应用声学或光学方法对温度场重建时,

选取误差分别为 0.05 及 0.1 相对应高温区域均方根误差,低温区域均方根误差及整体区域均方根误差大小如表 1 所示。

由表 1 可以发现,在测量误差较大的典型温度场重建上,声学法及光学法各有优劣,两种方法分别在低温区域及高温区域具有较明显的优势。分析原因:

(1) 对于声学方法,从谱分析的角度出发,火焰温度场的低频成份可以用有限个基函数来近似,高频的细节部分却无法获得,这始终是 SVD 算法的缺点^[9],但是由于 W 矩阵本身条件数很大,导致其抗噪能力极差,如果仅仅是用广义逆、Tikhonov(吉洪诺夫)正则化、ART(代数重建法)等算法,即便在误差 0.02 时,重建结果也无法保持原火焰的基本结构,这样仅仅在算法上便无法实现误差较大时的温度场重建。

(2) 对于光学方法,由于对于同一个安置于壁面的辐射能接收装置,不同距离的单元对于总辐射能的贡献是不同的,距离边界较近的低温介质单元只对某几个较近的接收器辐射能贡献较大,对其余距离较远的接收器辐射能影响较小,研究发现距离最远的单元和最近的单元对于装置接收到的总的辐射能的贡献可以相差 10^2 倍。在重建算法中,对于距离边界上的辐射能接收装置都较远的高温区域内,温度的 4 次方弥补了这一矛盾,所以高温区域的重建效果还是比较理想的。

6 结 论

本研究提出声光联合技术以弥补单一测量方法存在的较大误差。数值分析表明,当采用声光联合技术对炉膛单峰对称、单峰偏置和双峰对称温度场进行二维重建时,反演精度均提高了 0.01 左右,表明了此种融合方法的可行性和准确性,对炉膛温度场反演具有重要意义。

参考文献:

- [1] 王 飞. 基于计算机图像处理技术的火焰温度场测量和燃烧诊断[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.
WANG Fei. Measurement of the temperature field of flame based on the computer image processing technology and combustion diagnosis [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2000.
- [2] 沈国清, 安连锁, 姜根山. 炉膛烟气温度声学测量方法的研究与进展[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(4): 555-558.
SHEN Guo-qing, AN Lian-suo, JIANG Gen-shan. Latest research findings in the study of methods in acoustics for measuring temperatures of flue gases outgoing from furnaces [J]. Journal of Apparatus and Instruments, 2003, 24(4): 555-558.
- [3] KLEPPE J A. Engineering application of acoustics [M]. New York: Arch House, 1989.
- [4] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
ZHANG Xian-da. Matrix analysis and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [5] 李芝兰. 基于声层析成像的温度场重建技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2007.
LI Zhi-lan. Study of the temperature field reconstruction technology based on the acoustic tomography [D]. Shenyang Polytechnic University, 2007.
- [6] Modest M F. Radiative heat transfer (second edition) [M]. San Diego: Academic Press, 2003.
- [7] 周怀春. 炉内火焰可视化检测原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
ZHOU Huai-chun. In-furnace flame visualization inspection and measurement theory and technologies [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [8] Hammersley J M, Handscomb D C. Monte Carlo Methods [M]. New York: John Wiley & Sons, 1964.
- [9] 沈国清, 吴智泉, 安连锁, 等. 基于少量声学数据的炉内温度场重建[J]. 动力工程, 2007, 27(5): 702-705.
SHEN Guo-qing, WU Zhi-quan, AN Lian-suo, et al. In-furnace temperature field reconstruction based on the insufficient acoustic data [J]. Power Engineering, 2007, 27(5): 702-705.

(姜雪梅 编辑)

search status and interaction in seven aspects of cross section temperature gradient ,two-phase flow patterns ,heat convection ,operation mode flow instability ,thermal storage and control which resulted from above three factors and thermodynamic system own characteristics ,but also forecasts the development tendency of DSG system. In addition , the paper points out the improvement of DSG control system and its heat storage system will promote remarkably the development of DSG system. **Key words:** direct steam generation (DSG) ,non-uniform heat flux ,gas-liquid two-phase flow ,instability

基于声学与光学相联合的温度场重建技术数值模拟研究 = **Study on Numerical Simulation for Temperature Field Reconstruction Technology Based on the Optical and Acoustical Combined Theory** [刊 ,汉] HUANG Fan ,LIU Shi ,SONG Wei (Energy & Power Engineering School of North China Electric Power University ,Beijing , China ,Post Code: 102206) ,LIU Bo-yang (Huaneng Yuhuan Power Plant ,Yuhuan ,Zhejiang Province ,China ,Post Code: 317600) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31(3) . -16 -23

With the purpose of getting more accurate two-dimensional temperature field of furnace flame in order to realize the real-time monitoring of the furnace flame temperature ,the optical method and acoustical method are used respectively to model the temperature field reconstruction and deduct the simple matrix inversion formula ,meanwhile ,the singular value decomposition (SVD) algorithm is also adopted for the reconstruction of the two-dimensional temperature field in furnace. The numerical study shows that when the measuring errors are 0.05 and 0.1 ,the optical and acoustical measuring methods can obtain good reconstruction results separately in high-temperature region and in lower-temperature region. Hereby ,based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) ,the paper puts forward the optical and acoustical combined temperature field reconstruction technology for the two-dimensional reconstruction of furnace unimodal symmetric ,unimodal bias and bimodal symmetric temperature fields. The results show that the inversion accuracy can be increased by about 0.01 in comparison of optical method or acoustical method ,which proves the feasibility and accuracy of this combined method have the great significance on furnace temperature field inversion. **Key words:** two-dimensional temperature field of furnace flame ,exponential SVD algorithm ,analytic hierarchy process (AHP) ,optical and acoustical combined technology

热功复合驱动热泵循环的敏感性分析 = **Sensitivity Analysis on Heat Power Hybrid Driven Heat Pump Cycle** [刊 ,汉] ZHANG Na ,HAN Wei ,QI Hai-qing (Institute of Engineering Thermophysics ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing ,China ,Post Code: 100190) ,WANG Kang (State Nuclear Electric Power Planning Design & Re-