

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2310940

声学法炉内温度场与速度场协同测量方法研究*

孔倩^{1,2}, 姜根山³, 刘月超^{1,2}, 李鹏^{1,2}

(1. 华北电力大学数理系 保定 071003; 2. 华北电力大学河北省物理学与能源技术重点实验室 保定 071003;
3. 华北电力大学数理学院 北京 102206)

摘要:实时监测炉内燃烧温度场和烟气速度场是保证锅炉安全、经济运行的重要手段,声学法测物理场被认为是一种非侵入性和有效的测量方法。本文提出了一种基于声波法的炉内温度场和烟气速度场的协同测量新方法,建立了基于径向基函数的多物理场重建模型,采用 Tikhonov 正则化算法求解不适定问题,同时考虑了声波的折射效应对物理场的重建影响。采用典型的炉内物理场模型进行了数值模拟,模拟结果表明,本文方法能够很好的协同重建温度场和速度场。当考虑声线弯曲时能够显著提高各物理场的重建质量。算法具有较好的适应性和良好的抗噪性能,重建精度较高,标准均方根误差在10%以下。模拟实验平均计算时间为31.4 s,可保证炉内声学测量的实时性。声学法协同测量多物理场可为优化炉膛燃烧过程提供依据。

关键词: 声波测温; 声波测速; 协同测量; 重建算法; 径向基函数

中图分类号: TH811 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.20

Study on simultaneous measurement of temperature and velocity field in furnace based on acoustic tomography

Kong Qian^{1,2}, Jiang Genshan³, Liu Yuechao^{1,2}, Li Peng^{1,2}

(1. Department of Mathematics and Physics, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Hebei Key Laboratory of Physics and Energy Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
3. School of Mathematics and Physics, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Real time monitoring of combustion temperature field and flue gas velocity field in boiler is important to ensure the operation of boiler safely and economically. The acoustic tomography (AT) is considered to be a non-intrusive and effective method that can give information about temperature distribution and flow field. In this article, a novel method based on AT technology is proposed to reconstruct the temperature and velocity fields simultaneously. A multi-physical field reconstruction model based on radial basis function is formulated, and the Tikhonov regularization algorithm is used to solve ill-posed problems. In addition, we consider the refraction effect of the sound waves in the process of reconstruction. The numerical simulation results show the effectiveness of the proposed measurement method in simultaneously reconstructing the complex temperature distribution and velocity field. When the refraction effect of the sound waves is considered, the method can significantly improve the reconstruction quality of various physical fields. The reconstruction method has good anti-noise performance and high reconstruction accuracy with the normalized root mean square error of less than 10%. The average calculation time of the simulation experiment is 31.4 s, which can ensure the real-time performance of the acoustic measurement in the furnace. The proposed method of temperature and velocity fields simultaneous measurement can provide information to optimize the thermal fluid and combustion process in furnace.

Keywords: acoustic temperature measurement; acoustic velocity field measurement; simultaneous measurement; reconstruction method; radial basis function

0 引言

在大型火力发电厂的燃煤锅炉中,炉内气体温度场和烟气速度场的分布是反映燃烧过程和设备状态的重要参数,不仅对于锅炉控制和燃烧诊断具有十分重要的意义,还直接影响到煤粉的着火、燃尽以及锅炉的经济性和安全性,同时影响到污染物的排放量。因此,找到一种快速、简便又准确的炉内物理场的测量方法显得尤为重要,这对于提高燃烧效率、锅炉燃烧优化控制、节约能源以及减小环境污染等方面都有重要意义^[1]。

利用媒质中声传播特性与媒质温度场和速度场之间的相互关系进行声学测温 and 声学测速,是一种有效的非接触式软测量技术方法。目前对于电站燃煤锅炉,声学法检测技术主要集中在对炉膛温度场的测量,其理论较为完善^[2-4],测量速度场的探究较少^[5-7]。而针对炉膛声波法同时测量多物理场仍处于探索阶段。Schwarz 等^[8]通过测量声波传播时间同时重建了炉膛内温度场和速度场,研究了基于代数重建算法(algebraic reconstruction technique, ART)的重建算法。但其数值模拟在有噪声时重建质量较低。Green 等^[9]利用声波矢量层析成像法重建了燃烧气体的平均温度和速度及其空间分布。所求解标量分布由傅里叶级数表示,进行了高温和中温时的测量实验。Yu 等^[10]提出了一种声学非线性层析成像来重建流速场和温度分布。数值模拟结果表明,该方法重建多物理场是可行的,但计算时间较长,每种算例计算时间接近 2.3 h。Zhang 等^[11]使用无网格径向基函数和交替方向乘法对温度场和速度场进行了同时可视化的研究,并采用快速两点射线跟踪算法有效地跟踪声波传播路径,提高了物理场的重建性能。

大型燃烧锅炉炉膛内燃烧温度场和烟气速度场分布十分复杂,声波在复杂的炉内环境传播,温度场、流场等多场耦合会改变声波的传播速度,传播方向及其波阵面也会发生变化^[12-14]。而当前采用声波法重建温度场和速度场时大多假设声波沿直线传播,这使得物理场的重建质量不高。同时声波测多物理场是利用多个声收发器互相之间的声波传播时间来重建介质中的流体速度矢量场和温度场。由声波信号推导获得温度场和速度场信息的过程是一个“由结果反推原因”的反演过程,具有反演问题的复杂性^[15-16]。特别在由多条声波传播路径重建多物理场的过程中,其复杂性尤为突出。而且大多数的温度、速度测量手段都是分别对炉膛内温度和流动的测量,未将二者同时进行重建。因此对于声学法重建温度场和动力场这一反演问题的求解,多物理场的协同重建算法是其中关键的影响因素,直接关系炉内物理场重建效果。

1 声波法重建多物理场原理

根据声学理论,不考虑炉内烟气的流动,声波的传播速度与炉内温度有如下关系^[17]:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = z\sqrt{T} \quad (1)$$

式中: c 为声波的传播速度,单位为 m/s; γ 为比热比(无量纲量); $R=8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ 为普适气体常数; M 为气体摩尔质量,单位为 kg/mol; T 为空间温度分布函数,单位为 K。当烟气组分确定时,可直接简化为式(1)。

在炉膛某高度的炉壁上均匀布置 8 个声波传感器,形成 24 条声波传播路径,如图 1 所示。各传感器的声发射器依次发射声波信号,每个传感器的声接收器同时接收信号。所有传感器发射完毕后,计算出各个方向的声波传播时间。

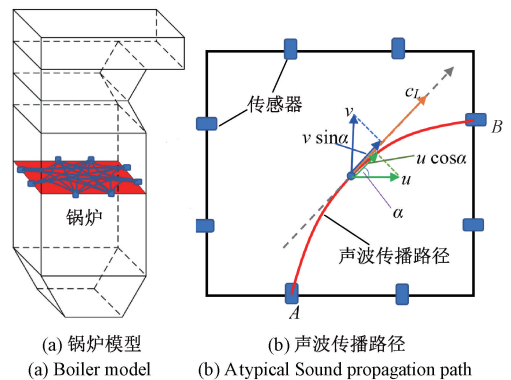


图 1 锅炉模型传感器布置与传播路径

Fig. 1 Arrangement of transceivers and a typical path in boiler

以 A-B 路径为例:

$$t_{AB} = \int_{L_{AB}} \frac{1}{c(x,y) + (\vec{P}_{AB} \cdot \vec{V}(x,y))} dl \quad (2)$$

$$t_{BA} = \int_{L_{BA}} \frac{1}{c(x,y) + (\vec{P}_{BA} \cdot \vec{V}(x,y))} dl$$

其中, t_{AB} 为从发射点 A 到接收点 B 的声波传播时间, t_{BA} 为 B 到 A 的声波传播时间。 $\vec{V}(x,y)$ 表示炉内烟气流速, \vec{P}_{BA} 为传播路径上的单位向量。高温炉膛内声速 $c(x,y)$ 远大于炉内烟气流速,因此可得:

$$\frac{t_{AB} + t_{BA}}{2} = \int_{L_{AB}} \frac{c(x,y)}{c(x,y)^2 - (\vec{P}_{AB} \cdot \vec{V}(x,y))^2} dl \approx \int_{L_{AB}} \frac{1}{c(x,y)} dl = \int_{L_{AB}} f(x,y) dl \quad (3)$$

$$\frac{t_{AB} - t_{BA}}{2} = - \int_{l_{AB}} \frac{\vec{P}_{AB} \cdot \vec{V}(x,y)}{c(x,y)^2 - (\vec{P}_{AB} \cdot \vec{V}(x,y))^2} dl \approx - \int_{l_{AB}} \frac{\vec{P}_{AB} \cdot \vec{V}(x,y)}{c(x,y)^2} dl \quad (4)$$

可测得A-B路径上声波的平均传播时间,由式(3)可得空间的声速分布,带入式(1)即可得到炉膛温度场分布;测得A-B路径上声波的传播时间差,由式(4)和测得的声速分布,测得烟气流速。

同时,声波在非均匀介质中传播,将不再沿直线传播,会发生声波路径的弯曲效应。如果声波从发射点A经过路径L到达接收点B,设y=y(x)是所求的传播路径,其微分形式为:

$$dL = \left(1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right)^{1/2} dx \quad (5)$$

声线相应的传播时间为:

$$t = \int_A^B \frac{dL}{c} = \int_A^B \frac{1 + y'^2}{Z\sqrt{T}} dx \quad (6)$$

根据费马原理和变分原理,可得二维温度场中声波传播所满足的微分方程为^[4]:

$$y'' = \frac{1 + y'^2}{2T(x,y)} \left(y' \frac{\partial T(x,y)}{\partial x} - \frac{\partial T(x,y)}{\partial y} \right) \quad (7)$$

式中:y' = dy/dx, y'' = d²y/dx²。两个端点分别是声波发射点和声波接收点。其边界条件如下:

$$\begin{cases} y_A = y(x) |_{x=x_A} \\ y_B = y(x) |_{x=x_B} \end{cases} \quad (8)$$

声波在非均匀温度场中的传播路径的数学模型式(7),其边界条件式(8)是两端固定,即声波发射器和接收器的坐标已知。数学模型为两点边值问题的二阶非线性微分方程,本文拟采用打靶法进行数值模拟。打靶法的核心思想是在求解高阶微分方程过程中采用降阶的方法将边值问题转化为初值问题。

令s₁ = y, s₂ = y',则上述微分方程化为:

$$\begin{cases} s'_1 = s_2 \\ s'_2 = \frac{1 + s_2^2}{2T(x,s_1)} \left\{ s_2 \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial T}{\partial s_1} \right\} \end{cases} \quad (9)$$

其边界条件式(8)转化为下式:

$$\begin{cases} s_1(x_1) = y_1 \\ s_2(x_1) = y'(x_1) = k \end{cases} \quad (10)$$

转化的初值问题可采用经典的四阶龙格-库塔算法求解即可满足精度要求,因此本文采用打靶法求解两点边值问题的声传播路径。

2 多物理场协同重建方法

2.1 温度场重建模型

针对式(3)采用径向基函数逼近声速倒数f(x,y),令:

$$f(x,y) = \sum_{m=1}^M \varepsilon_m \phi_m(x,y) \quad (11)$$

其中,φ_m(x,y)为径向基函数,ε_m是第m个基函数的待定系数,M是基函数的数量。本文中采用反二次径向基函数,则第k条传播路径上的平均传播时间可表示为:

$$t_k = \int_{l_k} f(x,y) dl_k = \int_{l_k} \sum_{m=1}^M \varepsilon_m \phi_m(x,y) dl_k = \sum_{m=1}^M \varepsilon_m \int_{l_k} \phi_m(x,y) dl_k = \sum_{m=1}^M \varepsilon_m a_{km} \quad (12)$$

则有如下的不适定方程:

$$\begin{pmatrix} \int_{l_1} \phi_1 dl_1 & \cdots & \int_{l_1} \phi_M dl_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \int_{l_i} \phi_1 dl_i & \cdots & \int_{l_i} \phi_M dl_i \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \int_{l_K} \phi_1 dl_K & \cdots & \int_{l_K} \phi_M dl_K \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 \\ \vdots \\ t_K \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$A\varepsilon = t \quad (14)$$

2.2 速度场重建模型

针对式(4),第k条路径的传播时间差化为:

$$\frac{\Delta t_k}{2} = - \int_{l_k} \frac{u_k \cos \theta_k + v_k \sin \theta_k}{c^2} dl = \int_{l_k} u_k d \frac{-l \cos \theta_k}{c^2} + \int_{l_K} v_k d \frac{-l \sin \theta_k}{c^2} = \int_{l_k} u_k dl'_k + \int_{l_K} v_k dl''_k \quad (15)$$

仍采用径向基函数分别逼近水平速度u和垂直速度v,即令:

$$u = \sum_{i=1}^M \omega_i \varphi_i, \quad v = \sum_{j=1}^M \omega_j \varphi'_j \quad (16)$$

则有:

$$\frac{\Delta t_k}{2} = \int_{l_k} \sum_{i=1}^M \omega_i \varphi_i dl'_k + \int_{l_K} \sum_{i=M}^{2M} \omega_i \varphi'_i dl''_k = \sum_{i=1}^M \omega_i \int_{l_k} \varphi_i dl'_k + \sum_{i=M}^{2M} \omega_i \int_{l_K} \varphi'_i dl''_k \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \int_{l_1} \varphi_1 dl'_2 & \cdots & \int_{l_1} \varphi_M dl'_2 & \int_{l_1} \varphi_{M+1} dl''_1 & \cdots & \int_{l_1} \varphi_{2M} dl''_1 \\ \int_{l_2} \varphi_1 dl'_2 & \cdots & \int_{l_2} \varphi_M dl'_2 & \int_{l_2} \varphi_{M+1} dl''_2 & \cdots & \int_{l_2} \varphi_{2M} dl''_2 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \int_{l_{K-1}} \varphi_1 dl'_{k-1} & \cdots & \int_{l_{K-1}} \varphi_M dl'_{k-1} & \int_{l_{K-1}} \varphi_{M+1} dl''_{K-1} & \cdots & \int_{l_{K-1}} \varphi_{2M} dl''_{K-1} \\ \int_{l_K} \varphi_1 dl'_k & \cdots & \int_{l_K} \varphi_M dl'_k & \int_{l_K} \varphi_{M+1} dl''_K & \cdots & \int_{l_K} \varphi_{2M} dl''_K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_M \\ \omega_{M+1} \\ \vdots \\ \omega_{2M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t_1}{2} \\ \frac{\Delta t_2}{2} \\ \vdots \\ \frac{\Delta t_{K-1}}{2} \\ \frac{\Delta t_K}{2} \end{bmatrix} \quad (18)$$

同样形成不适定方程:

$$\mathbf{B}\boldsymbol{\omega} = \mathbf{t}' \quad (19)$$

2.3 重建算法

对于式(14)和(19),考虑实际声波测量过程中声波的传播时间不可避免地存在测量误差。由于矩阵 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 的病态性和时间变量 \mathbf{t} 的测量误差,需要正则化方法来解决上述不适定问题。考虑经典的 Tikhonov 正则化方法^[18-19],式(14)和(19)分别转化为如下最小化问题:

$$\min \{ \|\mathbf{A}\boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{t}\|^2 + \alpha^2 \|\mathbf{L}\mathbf{x}\|^2 \} \min \{ \|\mathbf{B}\boldsymbol{\omega} - \mathbf{t}'\|^2 + \beta^2 \|\mathbf{L}\mathbf{x}\|^2 \} \quad (20)$$

其中, α, β 为正则化参数, L 为正则化矩阵,可得 Tikhonov 正则化解:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \alpha^2 \mathbf{L})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{t}, \quad \boldsymbol{\omega} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B} + \beta^2 \mathbf{L})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{t}' \quad (21)$$

分别将其带入式(5)和(10),即可重建对应的温度场和速度场。

2.4 协同重建流程

提出的考虑声线弯曲的温度场和速度场协同重建方法的过程可以描述如下:

1) 在被测区域四周布置声波收发器,获取 K 条有效声波传播路径;

2) 测量 K 条声传播路径的传播时间,得到每条路径的平均时间向量 \mathbf{t} 和时间差向量;

3) 在不考虑声线弯曲的情况下,重建燃烧温度场 \mathbf{T}_0 和烟气速度场 \mathbf{V}_0 ;

(1) 计算矩阵 \mathbf{A} ,求解式(14),重建温度场 \mathbf{T}_0 ;

(2) 将 \mathbf{T}_0 带入式(15),计算矩阵 \mathbf{B} ,求解式(19),重建速度场 \mathbf{V}_0 ;

4) 将 \mathbf{T}_0 带入声波传播路径模型中,求得 24 条声波传播路径;

5) 考虑声线弯曲的影响,重复步骤 3) 的(1)~(2),获得重建温度场 \mathbf{T}_1 和速度场 \mathbf{V}_1 ;

6) 将 \mathbf{T}_1 带入声波传播路径模型中,求得新的 24 条声波传播路径,重复步骤 5),计算新的重建温度场 \mathbf{T}_2 和 \mathbf{V}_2 ;

7) 重复步骤 6),直到重建结果满足收敛条件 $|\mathbf{T}_2 - \mathbf{T}_1| < e_1$ 和 $|\mathbf{V}_2 - \mathbf{V}_1| < e_2$ 为止。

3 数值模拟与结果分析

电站锅炉炉膛内温度场和烟气速度场是连续的、不断变化着的动态过程。为了验证所提协同重建方法的能力并评估重建结果,本文针对炉膛内某一特定空间区域,截面为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的正方形待测空间区域,采用典型的炉膛温度场模型,并加入四角切圆烟气流场,进行温度场和速度场的声学重建。

温度场模型:

$$T(x, y) = \frac{2000}{0.05((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2) + 1} \quad (22)$$

速度场模型:

$$\begin{cases} U_{\text{in}} = a \sqrt{(x - x_0)^2 + \frac{a^2}{b^2}(y - y_0)^2}, \\ \frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} \leq 1 \\ U_{\text{out}} = a' \sqrt{(x - x_0)^2 + \frac{a^2}{b^2}(y - y_0)^2}, \quad \text{其他} \\ \cos \theta = \frac{-a^2(y - y_0)}{\sqrt{b^4(x - x_0)^2 + a^4(y - y_0)^2}} \\ \sin \theta = \frac{b^2(x - x_0)}{\sqrt{b^4(x - x_0)^2 + a^4(y - y_0)^2}} \end{cases} \quad (23)$$

模型中各参数意义与文献[7]保持相同。

3.1 对称模型重建结果与分析

电站锅炉在理想的燃烧状况下,炉内燃烧达到稳定,温度分布和烟气流场呈单峰对称形式,如图 2(a) 所示。此时模型式(22)和(23)各参数取为 $(x_0, y_0, a, b, \alpha, \alpha') = (0, 0, 3.8, 3.5, 0.95, 0.8)$ 。图 2(b) 给出了在此模型下 24 条声波传播路径。由图 2 可知,由于声波在非均匀温度场和速度场中传播,其传播路径将不再沿直线传播,而是由低温区向高温区弯曲。并且由于模型物理场的对称性,声波传播路径也呈现了对称性。

图 3 和 4 分别给出了未考虑声线弯曲(假设声波沿直线传播)和考虑声线弯曲(声波曲线传播)时温度场和

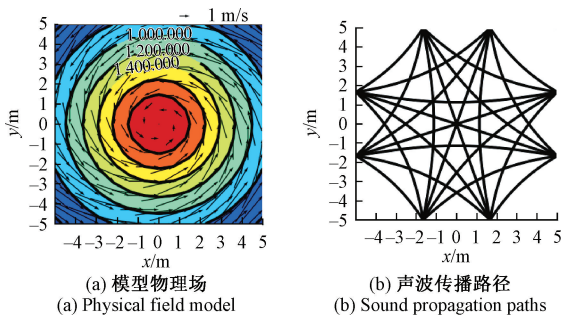
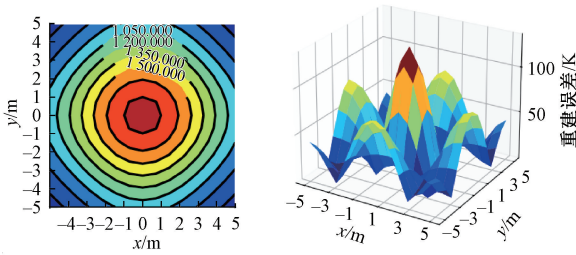
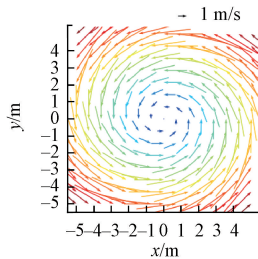


图2 对称温度场和速度场模型

Fig.2 Temperature and vortical flow models



(a) 温度场重建结果与重建误差
(a) Reconstruction results and absolute errors of temperature field



(b) 速度场重建结果与重建误差
(b) Reconstruction results and absolute errors velocity field

图3 未考虑声线弯曲时温度场和速度场的声学重建结果
Fig.3 Reconstruction results and absolute errors of fields without considering the effect of refraction

速度场的重建结果,并给出了对应的重建误差。由图3和4可以看出,当考虑了声线弯曲效应时,重建各物理场分布与模型物理场吻合较好,整个测量区域中各物理场的位置、大小和趋势等显著特征均被很好地重建,呈现出较高的重建质量。重建温度场的绝对误差都在30 K以下,较大误差主要分布在测量区域的角落和中心高温区。分析主要原因在于边界处的声物理信息较少,同时热点区域温度梯度变化较大导致的。与原始涡流速度场模型

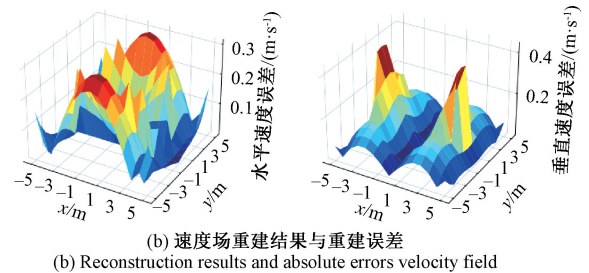
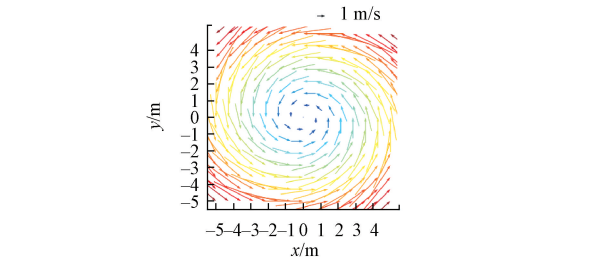
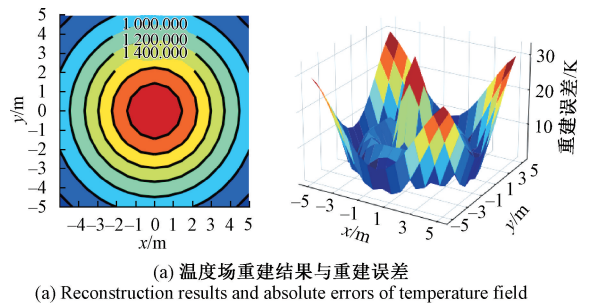


图4 考虑声线弯曲时温度场和速度场的声学重建结果
Fig.4 Reconstruction results and absolute errors of fields with considering the effect of refraction

相比,声学重建的涡流速度大小和流动趋势都吻合的较好。而未考虑声线弯曲效应时,声学重建的温度场和速度场都显示出了一定程度的失真现象,并且重建的绝对误差明显变大。温度场重建的最大绝对误差在中心高温处达120 K,重建速度场中,水平速度在测量角落处的误差增大,而垂直速度方向上无考虑声线弯曲效应相对误差变化不大。

3.2 偏斜模型重建结果与分析

当电站锅炉炉膛内燃烧不稳定,燃烧工况变得复杂时,如火焰中心发生偏移,温度分布和烟气流场呈现为单峰偏斜分布形式,如图5(a)所示。此时物理场模型中各参数取为 $(x_0, y_0, a, b, \alpha, \alpha') = (2, 2, 3.8, 3.5, 0.95, 0.8)$ 。图5(b)给出了在偏斜温度场和速度场模型下24条路径的传播路径,并在此路径下即考虑声线的弯曲效应重建了偏斜温度场和速度场,如图6所示。偏斜物理场下的声波传播路径不再具有对称性,但仍呈现由低温区向高温区弯曲的趋势。同时与未考虑声线弯曲效应的声学重建结果对比(如图7所示),考虑了声线弯曲时温度场和速度场重建结果能够更好的再现炉内整个测量

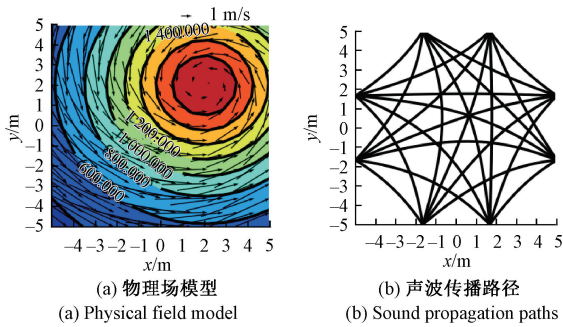
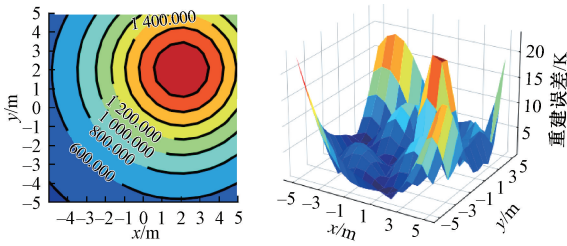
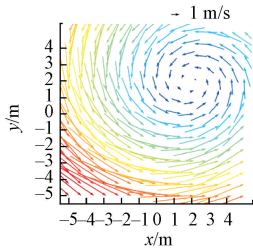


图5 偏斜温度场和速度场模型

Fig. 5 Temperature and vortical flow models



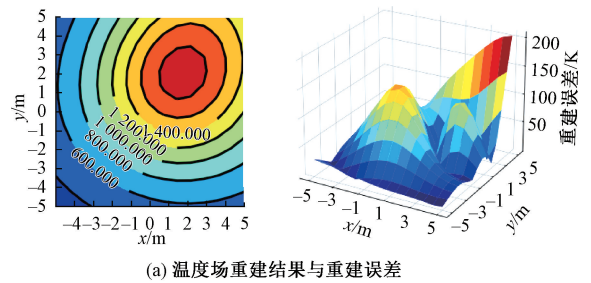
(a) 温度场重建结果与重建误差
(a) Reconstruction results and absolute errors of temperature field



(b) 速度场重建结果与重建误差
(b) Reconstruction results and absolute errors velocity field

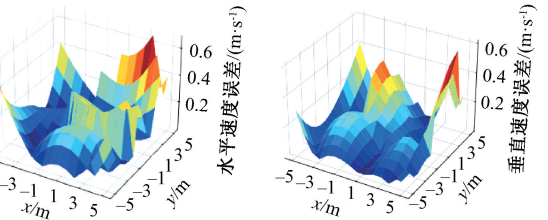
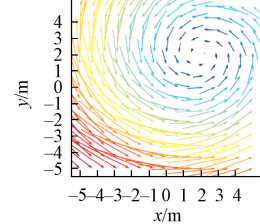
图6 考虑声线弯曲时温度场和速度场的声学重建结果
Fig. 6 Reconstruction results and absolute errors of temperature field and velocity field considering the effect of refraction

区域各物理场的整体布局,包括大小、位置和流动趋势,各个细节方面吻合较好,各物理量的相对误差也较小。并且相对于对称物理场的重建结果,由于偏斜物理场的复杂性,其重建效果相对较差。当未考虑声线弯曲时,温度场在高温边界处重建误差高达 200 K,水平速度和垂直速度在此区域的绝对误差也较大,均在 0.6 m/s 左右。而考虑了声线弯曲效应时,温度场的重建质量明显提高,整个区域的绝对误差均在 20 K 以下。水平速度和垂直速度的误差均有所减少。



(a) Reconstruction results and absolute errors of temperature field

- 1 m/s



(b) 速度场重建结果与重建误差
(b) Reconstruction results and absolute errors velocity field

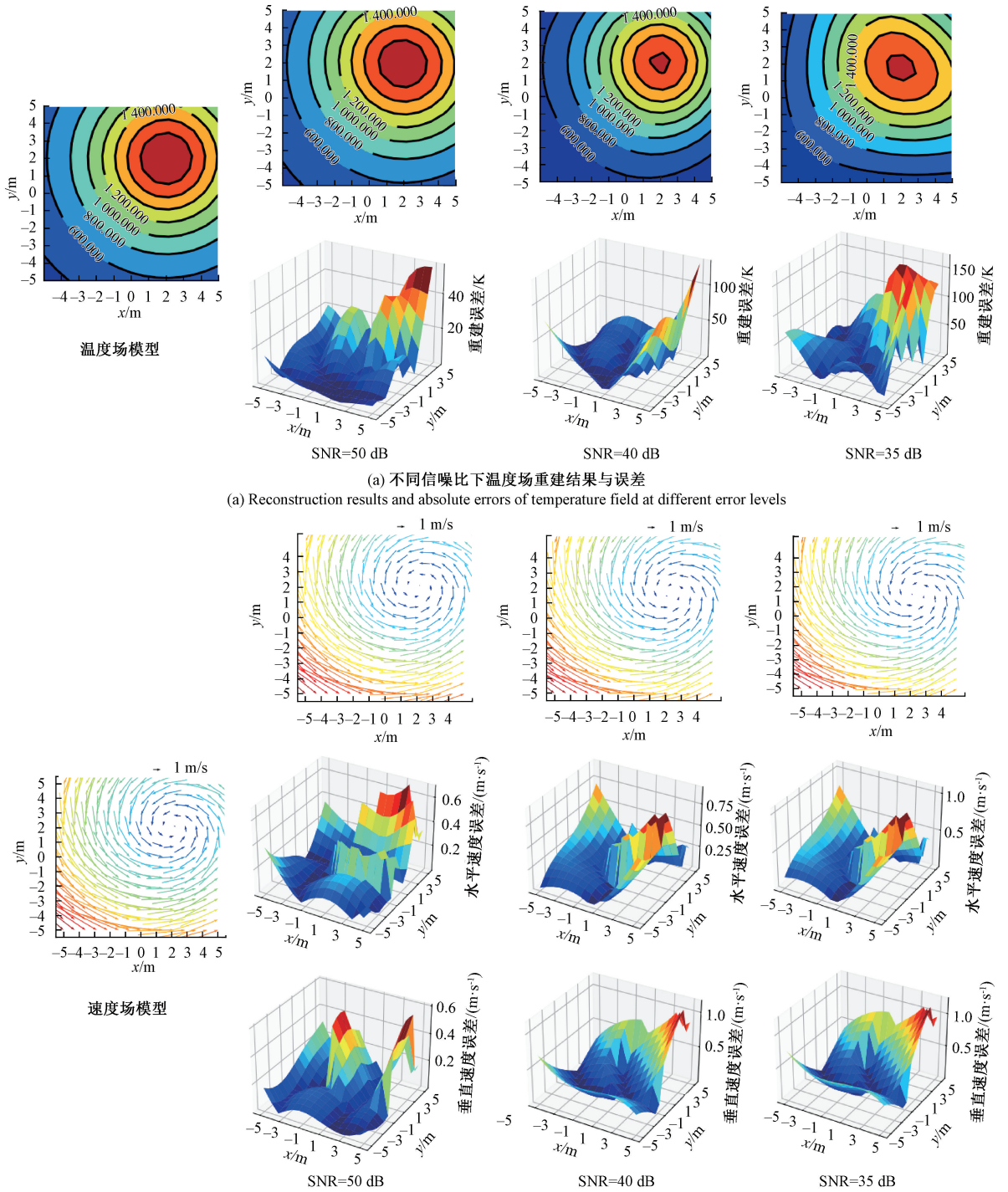
图7 未考虑声线弯曲时温度场和速度场的声学重建结果
Fig. 7 Reconstruction results and absolute errors of temperature field

3.3 协同重建算法抗噪性

为了测试该协同重建方法的抗噪声性能,在时间变量增加了不同程度的误差,针对单峰偏斜物理场模型进行声学重建。

图8分别给出了在信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)分别为 SNR=50、40 和 35 dB 时偏斜温度场和速度场的声学重建结果。由图8可知,即使存在一定的测量数据误差,与模型物理场相比,本文的重建算法仍可以得到比较理想的物理场重建结果,验证了所提协同重建算法具有较高的抗噪性能。随着信噪比的不同,温度场和速度流场有不同程度的失真,信噪比越小,各物理量的相对误差也都逐渐增大,尤其在测量区域的角落和物理量峰值处。

同时,文中还定量分析了重建方法的抗噪性。针对单峰偏斜模型进行了 60 次不同测量误差下的数值计算。平均计算时间为 31.4 s,可见本文提出的方法运行时间远小于参考文献[10](约 2.3 h)。图9给出了温度和速度分量的重建标准均方根误差(root mean square error, RMSE)。“*”点表示一次数值计算的重建误差,虚线为平均标准均方根误差。从图9中可以看出,各物理量的



(a) Reconstruction results and absolute errors of temperature field at different error levels

(b) Reconstruction results and absolute errors of velocity field at different error levels

图 8 不同信噪比下温度场和速度场的重建结果与误差

Fig. 8 Reconstruction results and absolute errors of temperature

field and velocity field with error level of SNR=50 dB, 40 dB and 35 dB

重建质量随着测量噪声的增加而逐渐降低。当信噪比分别为 50、40 和 35 dB 时,重建温度场的平均标准均方根误差分别为 1.722 5%、4.446 5%和 9.033 0%。与温度场

相比,重建速度分量的平均标准均方根误差随信噪比的不同其变化幅度较小。水平速度分量的平均标准均方根误差仅从 SNR=50 dB 时的 5.403 5%变为 SNR=35 dB

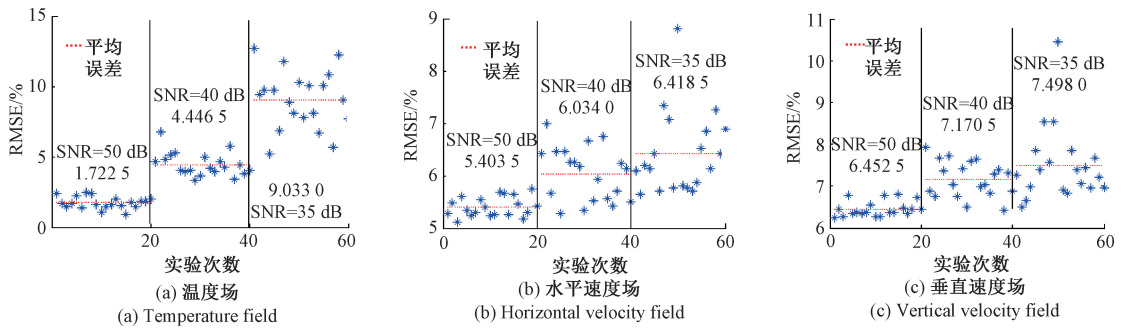


图9 不同测量误差下温度场、水平速度场和垂直速度场的重建质量

Fig. 9 Independent numerical computation of temperature field, horizontal velocity field, vertical velocity field under different measurement errors

时的6.4185%。同时发现,垂直速度的重建质量不如水平速度,当SNR=50 dB时,其平均标准均方根误差就达6.4525%。所以可知重建速度的垂直分量的误差大于水平分量误差。这些结果表明,本文的重建方法适用于在低信噪比条件下温度场和速度场的协同测量。

4 结 论

本文提出了一种基于声波法的炉内温度场和速度场协同测量方法。采用径向基函数分别逼近温度场、速度场的水平分量和垂直分量,建立了多物理场重建模型,并且考虑了声波的折射效应对各物理场的重建影响。针对典型的炉内物理场模型在不同的信噪比下分别进行了考虑和不考虑声线弯曲效应的数值模拟实验。模拟结果表明,该方法能够较好的协同重建温度场和速度场。当考虑了声线弯曲时能够显著提高各物理场的重建质量,具有较高的精度。不同信噪比下的重建质量验证了文中所提协同重建算法具有良好的抗噪性能,各物理场重建的平均标准均方根误差均在10%以下。此外,与文献[10]中的重建方法相比,本文方法运行时间较短,平均计算时间为31.4 s,可以保证炉内声学测量的实时性。

参考文献

- [1] ZHANG S, AN L, SHEN G, et al. Acoustic pyrometry system for environmental protection in power plant boilers[J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2014, 23(2): 24-35.
- [2] 孔倩,姜根山,孙建浩,等. 三维复杂温度场高精度声学测量方法[J]. *声学学报*, 2021, 46(5): 699-711.
- [3] KONG Q, JIANG G SH, SUN J H, et al. 3D high-

accuracy complicated temperature distribution reconstruction based on acoustic method[J]. *Acta Acustica*, 2021, 46(5): 699-711.

- [4] 沈雪华,熊庆宇,石欣,等. 基于收发分体声波换能器的二维温度场重建[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(8): 1715-1723.
- [5] SHEN X H, XIONG Q Y, SHI X, et al. Two-dimensional temperature field reconstruction based on split type acoustic transducers[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(8): 1715-1723.
- [6] KONG Q, JIANG G S, LIU Y C, et al. Numerical and experimental study on temperature field reconstruction based on acoustic tomography[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 170: 114720.
- [7] ZHANG J Q, QI H, JIANG D H. Acoustic tomography of two dimensional velocity field by using meshless radial basis function and modified Tikhonov regularization method[J]. *Measurement*, 2021, 175: 109107.
- [8] KONG Q, LU Y, JIANG G S, et al. Acoustic measurement of velocity filed using improved radial basic function neural network[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 202: 123733.
- [9] LI Y Q, ZHOU H C, CHEN S Y. Acoustic reconstruction of the velocity field in a furnace using a characteristic flow model [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 131(6): 4399-4408.
- [10] SCHWARZ A. Three-dimensional reconstruction of temperature and velocity fields in a furnace[J]. *Particle &*

- Particle Systems Characterization, 1995, 12 (2): 75-80.
- [9] GREEN S F. Acoustic temperature and velocity measurement in combustion gases [C]. Proceedings of the Eighth International Heat Transfer Conference, USA, 1986:555-560.
- [10] YU T, CAI W W. Simultaneous reconstruction of temperature and velocity fields using nonlinear acoustic tomography [J]. Applied Physics Letters, 2019, 115(10): 104104.
- [11] ZHANG J Q, QI H, REN Y T, et al. Acoustic tomography of temperature and velocity fields by using the radial basis function and alternating direction method of multipliers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 188: 122660.
- [12] 颜华,王善辉,刘丽钧,等.一种考虑声线弯曲的温度场重建算法 [J].声学学报,2014, 39(6): 705-713.
YAN H, WANG SH H, LIU L J, et al. A reconstruction algorithm of temperature field taking into account the bending of sound wave paths [J]. Acta Acustica, 2014, 39(6): 705-713.
- [13] KONG Q, JIANG G S, LIU Y C, et al. Location of the leakage from a simulated water-cooling wall tube based on acoustic method and an artificial neural network [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70:1-18.
- [14] 贾韶琦,宋志江,李言钦,等.炉内温度速度耦合场声线弯曲特性研究 [J].动力工程学报,2021, 41(8): 617-623.
JIA SH Q, SONG ZH J, LI Y Q. Research on the sound ray bending characteristics of temperature-velocity coupling field in furnace [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(8): 617-623.
- [15] 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. Reconstruction of temperature field based on small sonic time of flight data [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2): 470-475.
- [16] KONG Q, JIANG G S, LIU Y C, et al. 3D high-quality temperature-field reconstruction method in furnace based on acoustic tomography [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 179: 11569.
- [17] BRAMANTI M, SALERNO E A, TONAZZINI A, et al. An acoustic pyrometer system for tomographic thermal imaging in power plant boilers [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1996, 45: 159-167.
- [18] CALVETTI D, MORIGI S, REICHEL L, et al. Tikhonov regularization and the L-curve for large discrete ill-posed problems [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2000, 123 (1-2): 423-446.
- [19] 张立峰,苗雨.一种声学层析成像温度分布高分辨率重建方法 [J].系统仿真学报,2022, 34(9): 2065-2073.
ZHANG L F, MIAO Y. A high resolution reconstruction method of temperature distribution in acoustic tomography [J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(9): 2065-2073.

作者简介



孔倩,2004年于华北电力大学获得学士学位,2007年于西北工业大学获得硕士学位,2021年于华北电力大学获得博士学位,现为华北电力大学数理系副教授,主要研究方向为声学测量,声源定位。

E-mail: qiankongkong@126.com

Kong Qian received her B.Sc. degree from North China Electric Power University in 2004, received her M.Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2007, and received her Ph.D. degree from North China Electric Power University in 2021. She is currently an associate professor at North China Electric Power University. Her main research interests include acoustic tomography measurement and leakage location in boiler.



姜根山(通信作者),1983年于华北电力大学获得学士学位,1989年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2006年于华北电力大学获得博士学位,现为华北电力大学数理学院教授,主要研究方向为炉内声学理论。

E-mail: genshanjiang@ncepu.edu.cn

Jiang Genshan (Corresponding author) received his B.Sc.

degree from North China Electric Power University in 1983, received his M. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 1989, and received his Ph. D. degree from North China Electric Power University in 2006. He is currently a professor at North China Electric Power University. His main research interest is acoustic method in boiler.



刘月超, 2010 年于河北大学获得学士学位, 2014 年于华北电力大学获得硕士学位, 2019 年于华北电力大学获得博士学位, 现为华北电力大学数理系讲师, 主要研究方向为声学的非线性效应。

E-mail: liuyuechao@ncepu.edu.cn

Liu Yuechao received his B. Sc. degree from Hebei University in 2010, and received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from North China Electric Power University in 2014 and 2019,

respectively. He is currently a lecture at North China Electric Power University. His main research interest is acoustic nonlinear effects.



李鹏, 2004 年于华北电力大学获得学士学位, 2006 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 2012 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为华北电力大学数理系副教授, 主要研究方向为信号处理。

E-mail: lphit@163.com

Li Peng received his B. Sc. degree from North China Electric Power University in 2004, and received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Harbin Institute of Technology in 2006 and 2012, respectively. He is currently an associate professor at North China Electric Power University. His main research interest is signal processing.