

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2412605

流场声学层析成像测量方法仿真和实验研究*

孔倩^{1,2}, 赵义豪^{1,2}, 姜根山³, 王哲^{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:流速是实现工业生产过程在线监测和精准化控制的重要依据。为准确测得流场分布,提出了基于径向基函数结合均衡优化(RBF-EO)算法的流场声学层析成像方法。采用径向基函数逼近建立声学流场重建模型,利用均衡优化算法求解重建问题中的不适定方程。对典型的四角切圆速度场模型进行了数值模拟与算法的抗噪性检验,并将本算法与传统的重建方法:Tikhonov 算法、SVD 分解法和灰狼优化算法进行了比较。仿真结果表明该算法能够很好的反演出流场分布,具有较高的重建性能和良好的抗噪性。最后,在实验室进行了 1.05 m×1.05 m 的测量区域内的流场声学测量实验,并与飘带流场显示和风速仪测量结果进行了对比,结果显示,RBF-EO 算法与风速仪测量结果在 8 个测点的平均误差为 9.77%,验证了本文声波流场测量方法的可靠性。

关键词: 声波法; 流场测量; 声学层析成像; 均衡优化算法; 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

Numerical simulation and experimental study of flow field measurement based on acoustic tomography method

Kong Qian^{1,2}, Zhao Yihao^{1,2}, Jiang Genshan³, Wang Zhe^{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: Flow velocity is an important basis for realizing online monitoring and precise control of industrial production processes. In order to accurately measure the distribution of the flow field, a reconstruction method based on the combination of radial basis function and equilibrium optimizer (RBF-EO) algorithm is proposed. The radial basis function is used to approximate and establish the model for reconstructing the acoustic velocity field, and the equilibrium optimizer algorithm is used to solve the ill-posed equations in the reconstruction problem. Numerical simulation and noise resistance test of the algorithm were conducted on a typical four-corner tangential velocity field model, and the algorithm was compared with traditional reconstruction methods such as Tikhonov algorithm, SVD decomposition method, and gray wolf optimization algorithm. The simulation results showed that the algorithm can well reconstruct the flow field distribution with higher reconstruction performance and better noise resistance. Finally, the acoustic measurement experiment of the flow field in the measurement area of 1.05 m×1.05 m was carried out in the laboratory. The results were compared with the strip display and anemometer, and the average relative error is 9.77% between RBF-EO algorithm and anemometer measurement results at 8 measurement points, which verifies the reliability of the acoustic flow field measurement method in this paper.

Keywords: acoustic method; flow field measurement; acoustic tomography; equilibrium optimizer; radial basis function

0 引言

流速是工业过程检测的一个重要参数。对流速测量已经广泛应用于航空航天、石油化工、能源动力等工程领域。例如在大型电站锅炉燃烧时为保证炉内燃烧物充分且安全的燃烧,需要对炉内物理场进行监测,而锅炉中烟气速度是有效进行燃烧诊断和燃烧过程控制的重要基础。目前炉内流速测量方法包括热线风速计、激光多普勒测速仪、粒子图像测速仪和光场测速仪等^[1-3]。而声波测量技术被认为是一种高效的非侵入性软测量方法。

声波测量技术是一种利用声波发生器产生指定的声波信号,声波信号在流体中传播后经声波信号接收器接收,介质自身的流速将叠加在声波的传播速度上,使其发生相应的变化。通过分析信号中的流速信息来获取介质流速和温度信息的测量技术^[4-7]。Schwarz 等^[8]建立了声波传播时间与速度场的函数关系,通过测量声波传播时间利用代数重建方法(algebraic reconstruction technique, ART)反演了电站锅炉炉膛内烟气速度场。Johnson 等^[9]在利用声波层析方法重建烟气速度矢量场过程中,分析了声波传播时间测量误差对 ART 重建方法的影响,进一步完善了声学速度矢量场反演算法。Vechevin 等^[10]采用声学法测量了大气地表层的大气流场,通过随机反演层析成像方法重建了三维区域内的速度场,所重建出的速度场能够很好的反映设定流场的基本特征。王浩源等^[11]利用超声层析成像技术构建投影矩阵,采用代数迭代重建方法实现了管道三维流场的重建。王亮等^[12]和沈国清等^[13]使用了声学矢量层析成像原理,对电站锅炉炉内二维速度场进行重建,实现炉内速度场的在线监测。Zhang 等^[14]采用了径向基函数逼近与改进的 Tikhonov 正则化相结合的方法重建了二维速度场。将连续性的先验信息加入到流场重建中,通过改进的 Tikhonov 正则化缓解了速度场反演过程中方程的不适定性问题。并通过数值仿真证明了所提方法在速度场重建中的可行性和有效性。Zhang 等^[15]将炉内流场的先验信息和六参数超曲面引入到流场重建方案中,进行了炉内漩涡速度场的重建。Kong 等^[16]建立了径向基神经网络声学模型,对速度场进行了重建。对神经网络的各个超参数进行最优配置,并研究了声学传感器的个数和布置方案对重建结果的影响。然而,在处理炉内噪声干扰下的复杂流场测量时现有方法仍存在一定的局限性。如何进一步提升炉内烟气速度场重建精度以及算法的抗噪性,仍是亟待解决的关键问题。

为了提高流场速度的重建性能,本文研究了人工智能优化算法在炉内烟气流速测量中的应用。首先基于声

波测速原理,将速度矢量场分解为水平速度分量和垂直速度分量,并分别采用径向基函数对其进行逼近。对于反问题求解中的不适定方程使用均衡优化算法进行处理。针对四角切圆典型流场进行数值仿真与算法的抗噪性测试,并与传统 Tikhonov 重建算法、奇异值分解(singular value decomposition, SVD)和灰狼优化(grey wolf optimizer, GWO)算法进行比较,验证本文所提方法的可行性。最后本文搭建了实验平台,进行了流场声学重建方法的实验验证。

1 声学层析测速方法

1.1 声波测速原理

声波测流场是将声波传感器均匀布置在所测平面四周,可形成若干条声波传播路径,如图 1 所示。可以测量得到每一条路径正反方向的声波传播时间。

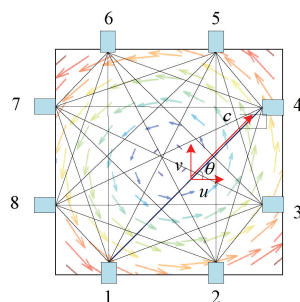


图1 传感器布置与传播路径

Fig. 1 The placement of sensors and sound propagation path

以传感器 1→传感器 4 路径为例,其正反方向的传播时间分别记为 t_l^+ 和 t_l^- , 其表达式为:

$$t_l^+ = \int_l [c(x, y) + (\vec{Q}_{l+} \cdot \vec{V}(x, y))]^{-1} dl \quad (1)$$

$$t_l^- = \int_l [c(x, y) + (\vec{Q}_{l-} \cdot \vec{V}(x, y))]^{-1} dl \quad (2)$$

式中: $\vec{V}(x, y)$ 表示流场速度, c 为声速, $\vec{Q}_{l+}$, $\vec{Q}_{l-}$ 分别表示正反两方向传播路径的单位向量。

由于介质流速通常比声速小很多,将上述两式相减得到:

$$t_l^+ - t_l^- = -2 \int_l \vec{Q}_{l+} \cdot \vec{V}(x, y) [c(x, y)^2 - (\vec{Q}_{l+} \cdot \vec{V}(x, y))^2]^{-1} dl \approx -2 \int_l \vec{Q}_{l+} \cdot \frac{\vec{V}(x, y)}{c(x, y)^2} dl \quad (3)$$

将流场速度分解为水平速度分量 u 和垂直速度分量 v , 则式(3)可化为:

$$\begin{aligned} \frac{t_l^+ - t_l^-}{2} = & - \int_l \frac{u \cos \theta + v \sin \theta}{c(x, y)^2} dl = - \left(\int_l \frac{u \cos \theta}{c(x, y)^2} dl + \right. \\ & \left. \int_l \frac{v \sin \theta}{c(x, y)^2} dl \right) = - \left(\int_l \frac{u}{c(x, y)^2} dl \cos \theta + \int_l \frac{v}{c(x, y)^2} dl \sin \theta \right) = \\ & \int_l u d \frac{-x}{c(x, y)^2} + \int_l v d \frac{-y}{c(x, y)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

1.2 速度场重建模型

径向基函数能够逼近任意的非线性函数,具有良好的泛化能力,在非线性函数逼近、数据分类、图像处理、模式识别等各个领域均应用广泛。笔者前期采用径向基函数逼近方法重建了温度场,取得了较好的重建效果^[17-18],为速度场的重建做了良好的铺垫。

采用径向基函数逼近速度场的水平速度 u 和竖直速度 v , 分别将其表示为 N 个径向基函数的线性组合,

$$u(x, y) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \varphi_i(x, y), \quad v(x, y) = \sum_{j=1}^N \mu_j \varphi_j(x, y) \quad (5)$$

式中: $\varphi(x, y)$ 为径向基函数, λ, μ 为基函数的组合系数。将式(5)带入式(4)中:

$$\frac{\Delta t_l}{2} = \int \sum_{i=1}^N \lambda_i \varphi_i(x, y) ds + \int \sum_{j=1}^N \mu_j \varphi_j(x, y) ds' \quad (6)$$

对 24 条传播路径依次进行上述求解,则得到如下的线性方程组形式,

$$\begin{bmatrix} \int_{l_1} \varphi_1 ds & \cdots & \int_{l_1} \varphi_N ds & \int_{l_1} \varphi_1 ds' & \int_{l_1} \varphi_N ds' \\ \int_{l_2} \varphi_1 ds & \cdots & \int_{l_2} \varphi_N ds & \int_{l_2} \varphi_1 ds' & \int_{l_2} \varphi_N ds' \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \int_{l_{k-1}} \varphi_1 ds & \cdots & \int_{l_{k-1}} \varphi_N ds & \int_{l_{k-1}} \varphi_1 ds' & \int_{l_{k-1}} \varphi_N ds' \\ \int_{l_k} \varphi_1 ds & \cdots & \int_{l_k} \varphi_N ds & \int_{l_k} \varphi_1 ds' & \int_{l_k} \varphi_N ds' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ \mu_1 \\ \vdots \\ \mu_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t_1}{2} \\ \frac{\Delta t_2}{2} \\ \vdots \\ \frac{\Delta t_{k-1}}{2} \\ \frac{\Delta t_k}{2} \end{bmatrix}$$

简化为矩阵形式:

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

其中, $\mathbf{A} \in R^{k \times 2N}$ 为径向基积分矩阵, k 为声波路径数, $\boldsymbol{\omega}$ 为径向基函数组合系数向量, $\Delta \mathbf{t}$ 为时间差向量。

在速度场重建过程中,声波传播路径上的时间差向量可测量得到,径向基积分矩阵 $\mathbf{A}$ 也可计算获得。由式(7)即可求解径向基函数的组合系数,代入式(5),即可获得整个被测区域的速度场分布。

2 声波测速重建算法

在实际声波测速应用中,声波传播时间往往存在测量误差 t_{error} , 则式(7)化为:

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\omega} = \Delta \mathbf{t} + \mathbf{t}_{\text{error}} \quad (8)$$

同时矩阵 $\mathbf{A}$ 具有一定的病态性,对于这个不适定方程组,可以转化为一个优化问题,目标函数为:

$$f = \arg \min \{ \|\mathbf{A}\boldsymbol{\omega} - \Delta \mathbf{t}\|_2^2 \} \quad (9)$$

不适定方程的解就是使目标函数达到最小时的 $\boldsymbol{\omega}$, 本文采用均衡优化算法求解此优化问题。

2.1 均衡优化算法

均衡优化算法 (equilibrium optimizer, EO) 是基于不同溶液混合时处于动态平衡这一物理模型提出的一种新型优化算法。此算法具有高探索性和开发性等优点,在多变量的优化问题上有很好的性能,而且算法的随机引导机制有助于算法避免陷入局部最优解,从而更好地在全局范围内搜索最优解^[19-21]。

EO 算法主要的平衡方程为:

$$\vec{C}(\tau + 1) = \vec{C}_{eq} + [\vec{C}(\tau) - \vec{C}_{eq}] \vec{F} + \frac{G}{\lambda V} (1 - \vec{F}) \quad (10)$$

$$\text{其中, } \begin{cases} \vec{F} = e^{-\vec{\lambda}(t-t_0)} \\ t = \left(1 - \frac{Iter}{Max_iter}\right) \left(\frac{a_{2Max_iter}}{2}\right) \\ \vec{t}_0 = \frac{1}{\lambda} \ln(-a_1 \text{sign}(\vec{r} - 0.5) [1 - e^{-\vec{\lambda}t}]) + t \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\vec{C}(\tau + 1)$ 为迭代到第 $\tau + 1$ 次时的浓度; $\vec{C}_{eq}$ 为体积内溶液平衡时的浓度; λ 为流动率; V 为容积的体积; G 为生产率; $\vec{F}$ 为指数项。 a_1 是控制探索能力的恒定值。 a_1 越高,勘探能力越好,开发效果越低。同样, a_2 越高,开发能力越好,勘探能力越低。迭代方程式(10)可以分为 3 个部分:

$\vec{C}_{eq}$: 随机给的初始浓度,这一项可以看成粒子的搜索方向;

$[\vec{C}(\tau) - \vec{C}_{eq}] \vec{F}$: 迭代时的浓度与均衡池中最优的做差,主导全局搜索功能;

$\frac{G}{\lambda V}(1 - \vec{F})$: 最优解附近进行寻优,即负责搜索最优

解的邻域解。

基于上述分析,均衡优化算法反演速度场时,优化器中粒子的浓度就对应所求的 ω 向量,优化问题的最优解即为不适定方程式(7)的解。

2.2 重建步骤

RBF-EO 算法重建流场速度的过程可以描述如下:

步骤 1) 在流场测量区间每边布置两个传感器,传感器之间接收发信号形成 24 条声波传播路径;

步骤 2) 径向基函数逼近速度场,计算径向基积分矩阵 A 与声波传播时间差向量 Δt ;

步骤 3) 设置 EO 算法的初始化参数,包括总迭代次数 Max_iter ,搜索区间,参数 a_1, a_2 等;

步骤 4) 在搜索区间内初始化各粒子浓度值 $\vec{C}_0 = \omega_0$ 以及均衡池中 5 个粒子的适应度值 f ,在本问题中,适应度值越小越好。迭代开始, $Iter = 1$;

步骤 5) 计算各个粒子的适应度值 $f0 = A\omega_0 - \Delta t$ 。在均衡池的 5 个粒子和种群的所有粒子中,挑选适应度值较小的 4 个粒子,并将其与均衡池中粒子进行替换,更新均衡池;

步骤 6) 根据粒子浓度计算公式,指数项 $\vec{F}$ 与生成率 $\vec{G}$,计算下一步迭代各粒子新的浓度 $\vec{C}_1 = \omega_1$ 和新的适应度 $f1 = A\omega_1 - \Delta t, Iter = Iter + 1$;

步骤 7) 若 $Iter < Max_iter$,更新种群粒子浓度 $\omega_0 = \omega_1$ 和适应度 $f_0 = f_1$,返回步骤 5) 继续迭代,否则进行下一步;

步骤 8) 迭代完成,得出算法求解的 ω ;

步骤 9) 将 ω 带入式(6),重建出速度场。

3 数值仿真

本文采用四角切圆流场进行数值仿真。待测区域为截面为 10 m×10 m 的正方形空间。速度场表示为:

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

$$\sin\theta = \frac{b^2(x - x_0)}{\sqrt{b^4(x - x_0)^2 + a^4(y - y_0)^2}} \quad (12)$$

仿真速度场模型分别为单涡对称速度场、单涡偏斜速度场和双涡速度场,其中双涡速度场由两个单涡速度场叠加成。3 种速度场模型各参数如表 1 所示。

表 1 四角切圆速度场仿真模型参数

Table 1 Four corner tangential velocity field simulation model parameters

速度场 模型	切圆中心 (x_0, y_0)	切圆半径 a b		速度场斜率 α α'	
单涡对称速度场	(5,5)	3.8	3.5	0.95	0.8
单涡偏斜速度场	(7,7)	3.8	3.5	0.95	0.8
双涡速度场	(3,3)	2.2	2.2	2	-1
	(7,7)	2.2	2.2	-2	1

3.1 重建质量评价指标

采用本文方法重建流场分布后,为了评价方法的重建质量,引入平均误差 E_{ARE} 、均方根百分比误差 E_{RMSE} 2 个指标来评价方法的重建性能,其中:

$$E_{ARE} = \frac{1}{2N} \left(\sum_{i=1}^N |u_r(i) - u_o(i)| + |v_r(i) - v_o(i)| \right) \times 100\% \quad (13)$$

$$E_{RMSE} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (V_r(i) - V_0(i))^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N V_0(i)^2}} \quad (14)$$

式中: $u_r(i), v_r(i)$ 分别为重建得到的水平和垂直速度分量, $u_o(i), v_o(i)$ 则为原模型速度分量。 V_r, V_0 分别为重建速度和模型速度。

3.2 重建结果与分析

图 2~4 分别给出了单涡对称、单涡偏斜和双涡速度场的声学重建结果和误差图。表 2 给出了重建质量的各个评价指标值。分别采用传统的 Tikhonov 正则化方法、SVD 分解法, GWO 算法和 EO 重建方法进行了数值仿真。其中, Tikhonov 方法中正则化参数为 1×10^{-12} , GWO 算法设置狼群总数为 500, 迭代次数为 700 次, EO 方法粒子总群数为 500, 迭代次数为 200 次。由图 2~3 可见对于单涡速度场各种重建方法都能较好地重建出速度场分布, 包括涡流中心位置, 切圆半径, 涡流的运动趋势等。相较于其他方法的重建结果, 在 SVD 重建速度分布中, 其涡流形状存在一定的畸变, 由圆形畸变成一近似方形。各方法的重建误差图显示水平速度分量和垂直速度分量在被测区域边界处, 尤其四个角落的水平速度重建误差较大。主要原因在于边角处的声学信息较少导致的。

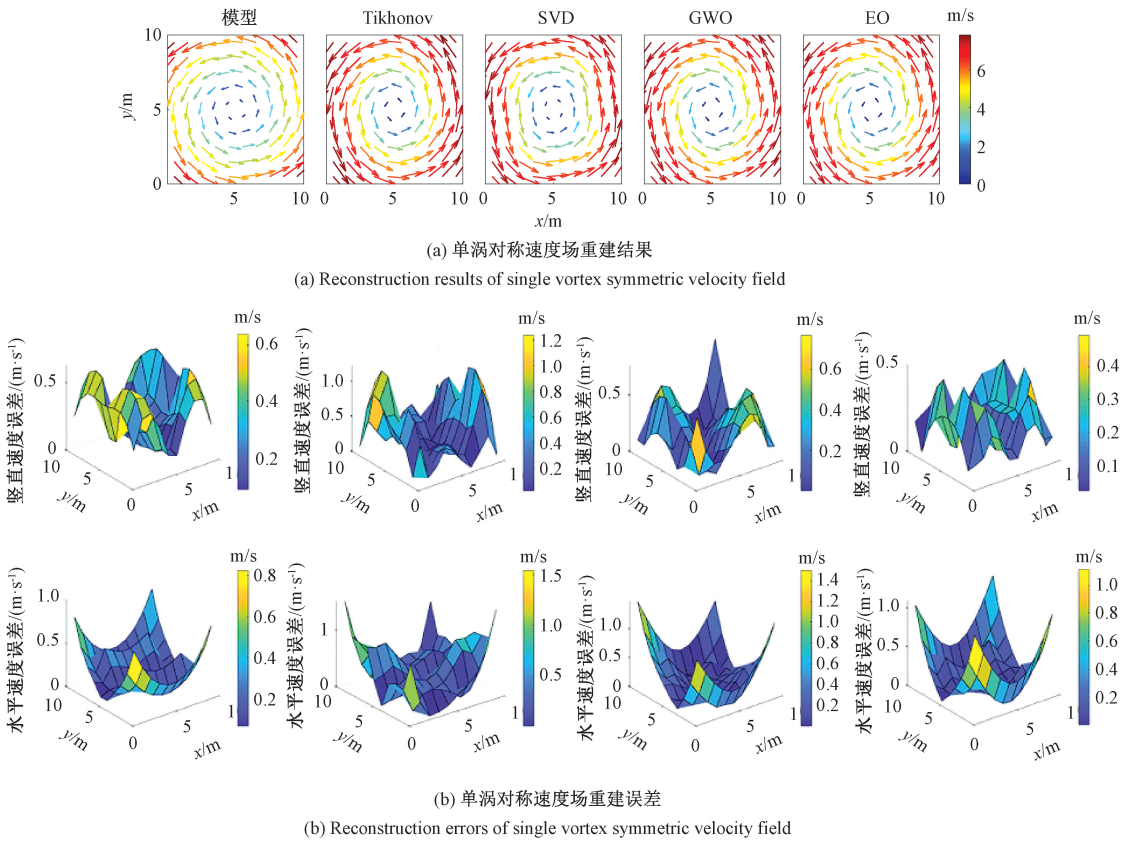


图 2 不同重建算法单涡对称速度场重建结果(a)和重建误差(b)

Fig.2 Reconstruction results (a) and reconstruction errors (b) of single vortex symmetric velocity field with different reconstruction algorithms

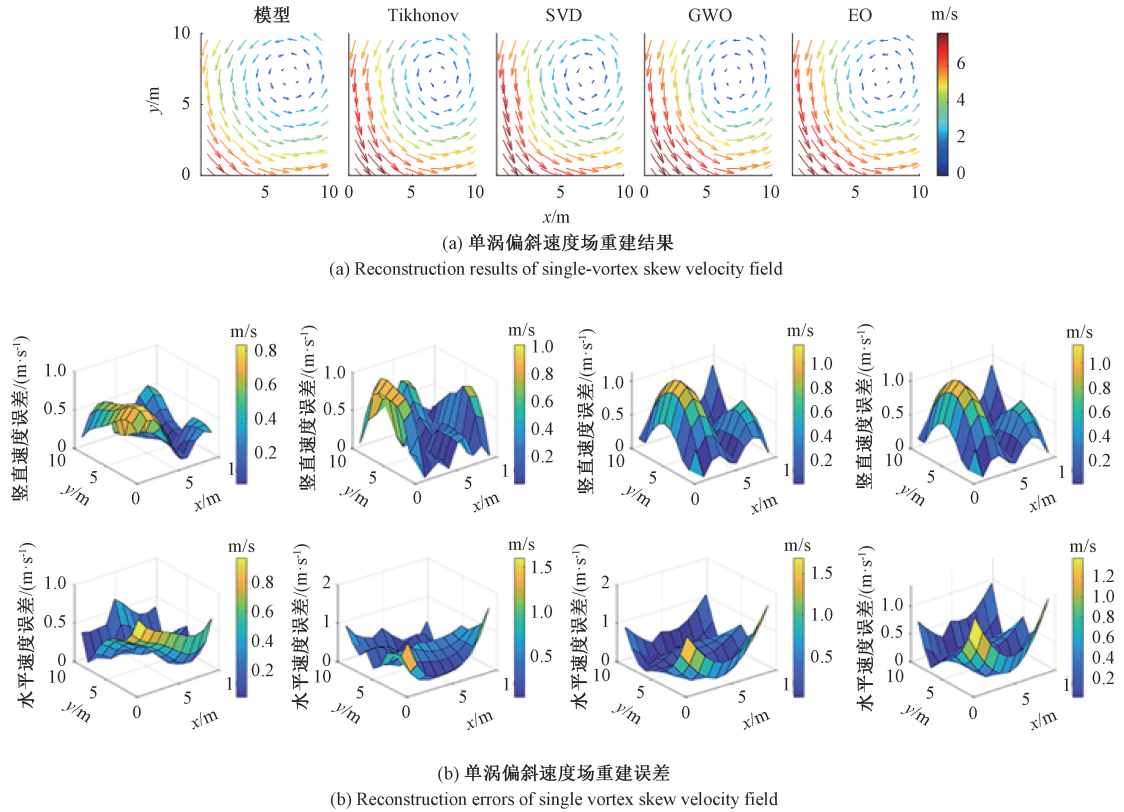


图 3 不同重建算法单涡偏斜速度场重建结果(a)和重建误差(b)

Fig.3 Reconstruction results (a) and reconstruction error (b) of a single vortex skewed velocity field with different reconstruction algorithms

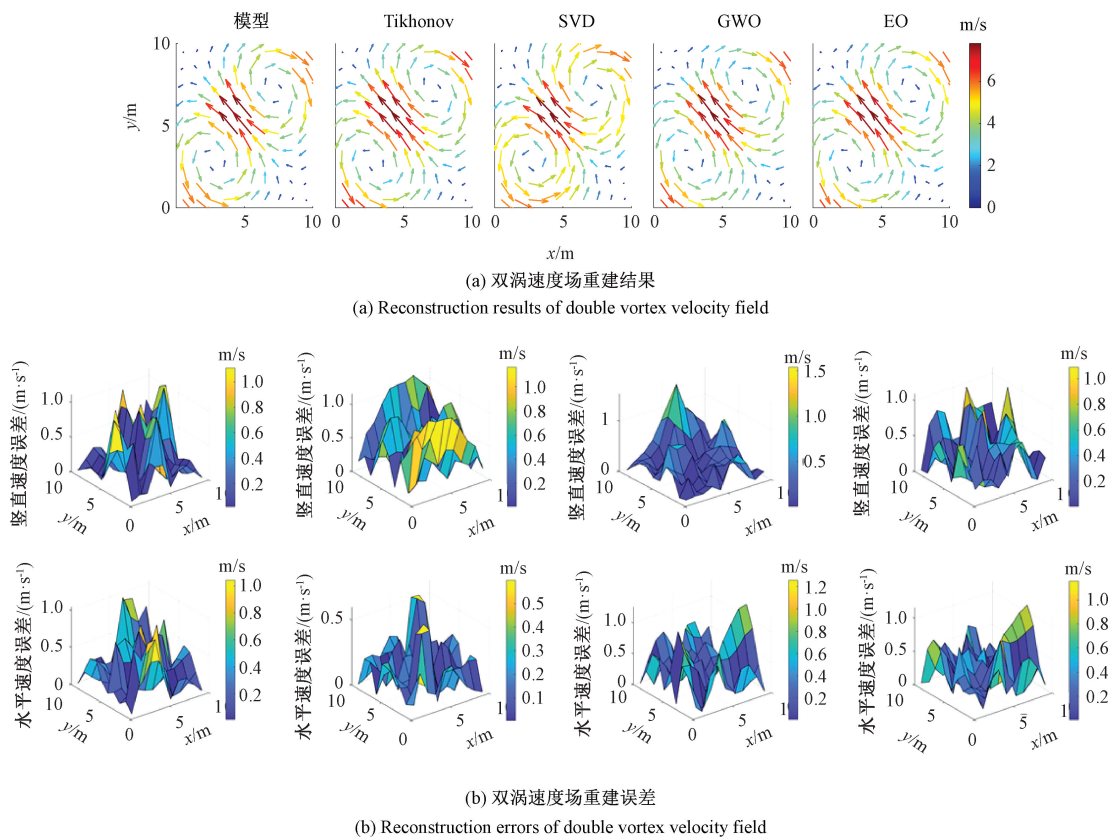


图 4 不同重建算法双涡斜速度场重建结果和重建误差

Fig. 4 Reconstruction results and reconstruction errors of double vortex velocity field with different reconstruction algorithms

对于双涡速度场的重建结果和误差如图 4 所示。SVD 分解法和 GWO 的涡流形状信息有一定程度的改变,相比之下,Tikhonov 正则化方法、和 EO 方法的重建结果保持了较好的涡形,整体的速度场分布与原速度场模型相似。

对参与评价的各个方法的重建质量进行定量分析,表 2 给出了评价指标值。由表可以得到,在 3 种速度场模型中,提出的 RBF-EO 算法结果误差最小,对应的均方根误差分别为 0.138、0.133 和 0.148,误差最大的算法为 SVD 分解法和 GWO 算法。

总之本文提出的 RBF-EO 速度场重建方法适应不同类型的炉内烟气速度场模型,其重建误差低于传统的重建方法,具有较高的重建质量。

3.3 算法抗噪性检验

在声波测流场速度的实际应用中,声波的传播时间总存在测量误差。为了评估不同重建方法的抗噪性能,在声波传播时间差项 Δt 增加噪音水平为 15% 的随机误差,进行速度场重建数值仿真。图 5~7 分别给出了各种重建算法对单涡对称、单涡偏斜和双涡速度场的重建结果和重建误差图。由图可见,当加入噪音时,各个方法的重建误差明显增大,尤其与 EO 优化算法相比,传统的

表 2 不同重建算法的重建误差			
Table 2 Reconstruction errors with different reconstruction algorithms			
模型	方法	平均误差 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	均方根 误差
单涡对称 速度场	Tikhonov	0.319	0.143
	SVD	0.418	0.206
	GWO	0.333	0.167
	EO	0.268	0.138
单涡偏斜 速度场	Tikhonov	0.360	0.141
	SVD	0.409	0.165
	GWO	0.401	0.164
	EO	0.321	0.133
双涡 速度场	Tikhonov	0.358	0.167
	SVD	0.382	0.175
	GWO	0.396	0.176
	EO	0.344	0.148

重建算法 Tikhonov 方法和 SVD 算法对噪音较敏感,重建速度场分布相对于原模型都出现了不同程度的畸变,

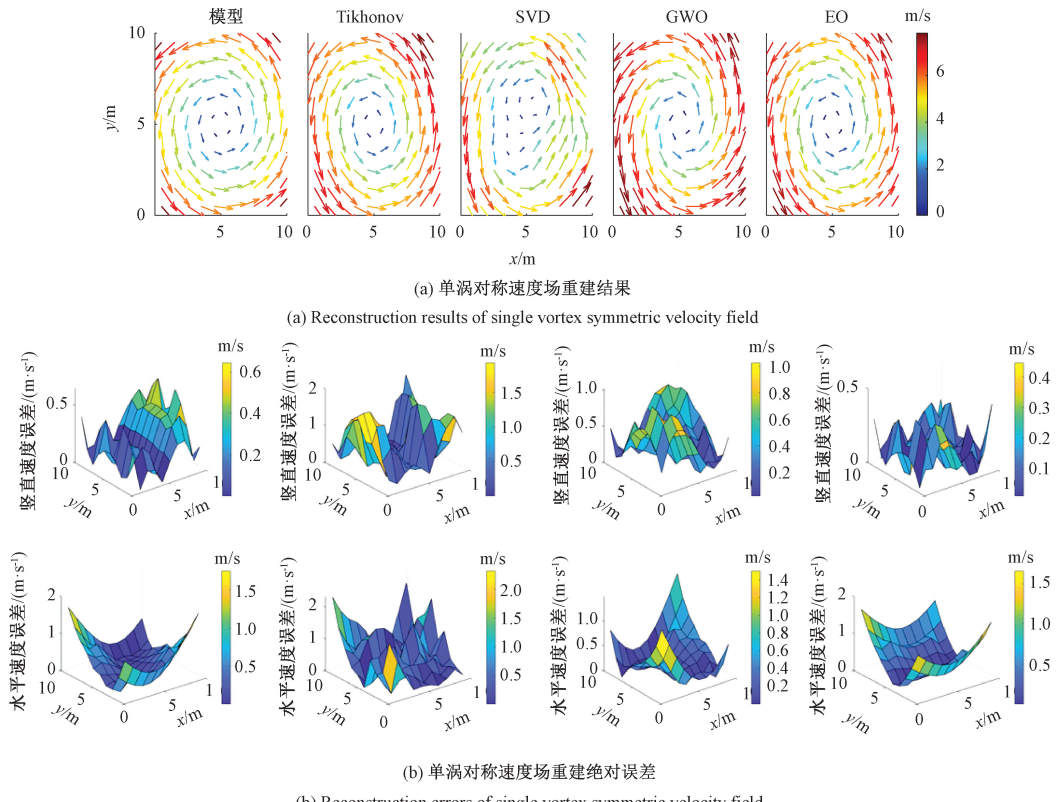


图 5 15% 噪音下不同重建算法单涡对称速度场重建结果和重建误差
Fig. 5 Reconstruction results and reconstruction errors of single vortex symmetric velocity field with different reconstruction algorithms under 15% noise

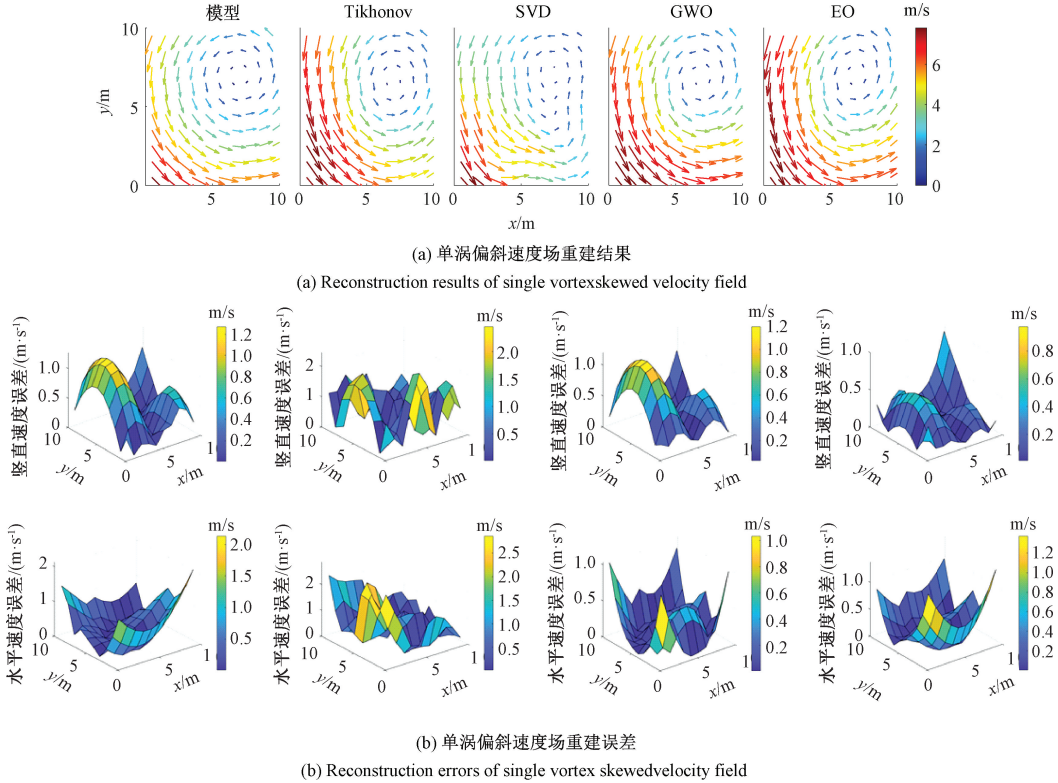


图 6 15% 噪音下不同重建算法单涡偏斜速度场重建结果和重建误差
Fig. 6 Reconstruction results and reconstruction error of a single vortex skewed velocity field with different reconstruction algorithms under 15% noise

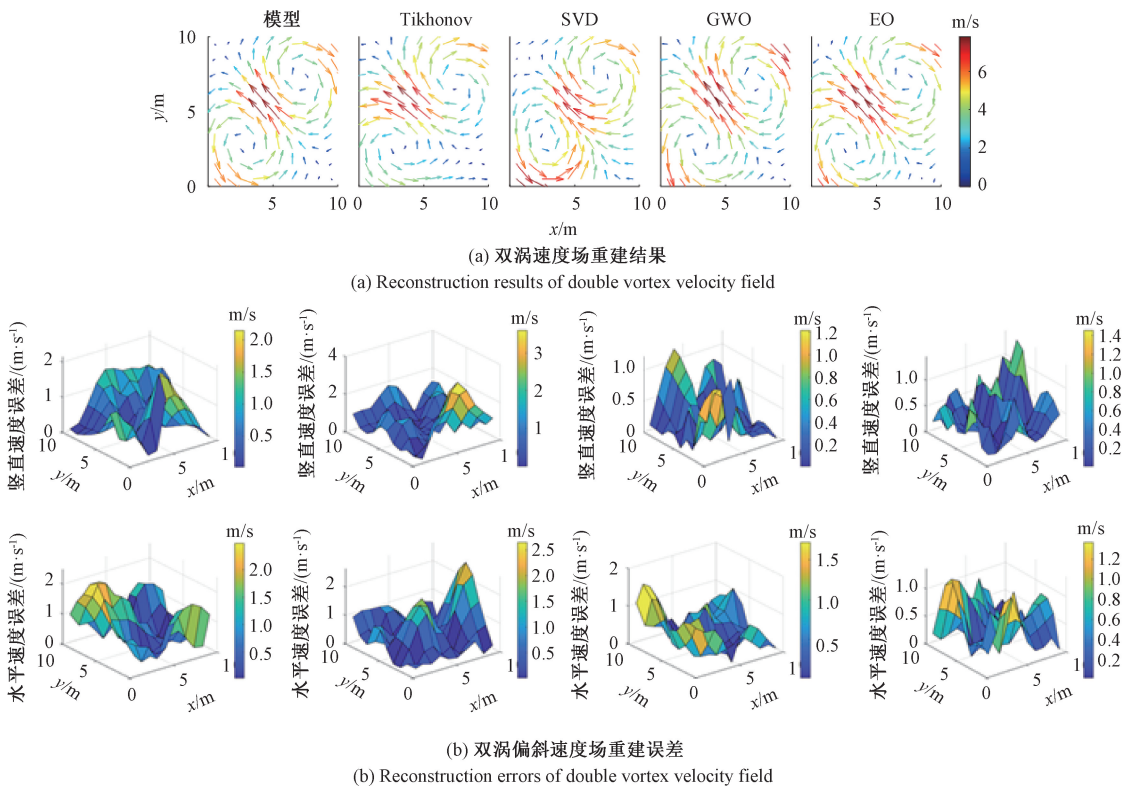


图7 15% 噪音下不同重建算法单双涡速度场重建结果和重建误差

Fig. 7 Reconstruction results and reconstruction errors of double vortex velocity field with different reconstruction algorithms under 15% noise

涡流场细节方面吻合度不高。而 EO 算法的重建速度场涡流外形畸变较小,水平方向和垂直方向速度分量重建误差较小,整体速度场分布接近原模型速度场,表现出了良好的抗噪性能。

进一步验证重建算法的抗噪性能,比较不同噪声水平对速度场重建性能的影响,将每种重建方法独立运行 30 次,得出每次的均方根误差并求其均值,如图 8~10 所示。对于单涡对称和单涡偏斜速度场,当加入 5%、10% 和 20% 的随机噪声时,EO 方法平均均方根误差均低于其它算法的重建误差,而且随着噪声水平的增加,其平均均

方根误差的增长率较低,以单涡对称为例,仅从 0.133 增长 0.161。对比 SVD 算法,当噪声水平为 5% 时,其均方根误差为 0.264,当噪声水平增长为 20% 时,其误差增长至 0.718,算法呈现较差的抗噪性。对于双涡速度场,当噪音水平为 5% 时,各个方法的抗噪性能相差不大,但当噪声水平达到 20% 时,Tikhonov 方法和 SVD 算法误差均有了大幅度的增长,而 EO 算法的均方根误差为 0.229,与其它重建方法相比仍然呈现最佳的重建质量。总之,本文 RBF-EO 重建方法在各种速度场重建模型和高噪声等级下,表现出良好的抗噪性能,重建误差也相对较低。

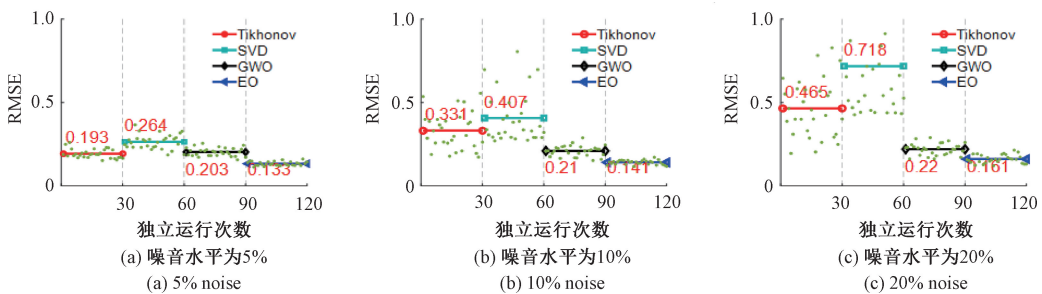


图8 单涡对称速度场不同噪声水平下的重建质量

Fig. 8 Reconstruction quality of single vortex symmetric velocity field under different noise levels

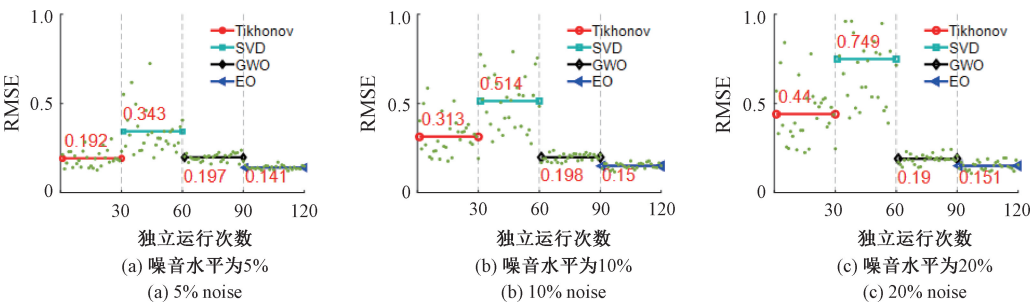


图 9 单涡偏斜速度场不同噪声水平下的重建质量

Fig. 9 Reconstruction quality of a single vortex skewed velocity field under different noise levels

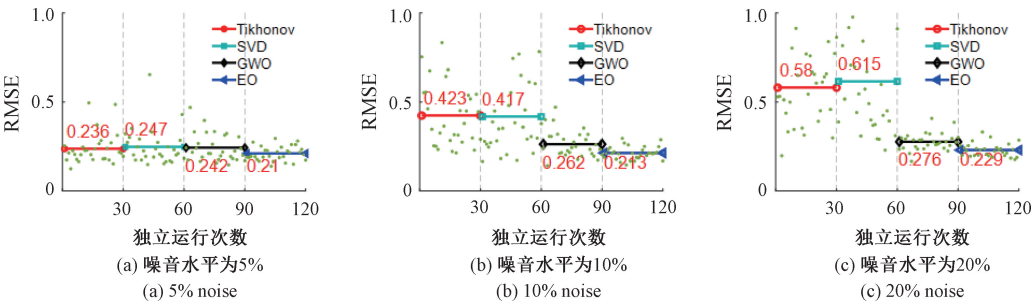


图 10 双涡速度场不同噪声水平下的重建质量

Fig. 10 Reconstruction quality of double velocity field under different noise levels

4 实验验证

声波法气体流速测量系统由两部分组成:硬件系统和软件系统。硬件系统主要实现信号的发生采集、声波信号的功率放大以及声波信号的采集。信号的发生采集功能可由数据采集卡实现,声波信号的功率放大和声波信号的采集由信号调理电路完成。数据采集卡需要完成声波信号的发生与传声器信号的采集。本文在实验室进行了 1.05 m×1.05 m 的测量区域内的声学测量实验,利用 4 个风机形成四角切圆流场,采用 RBF-EO 算法重建流场分布。表 3 给出了声波测速系统所需主要硬件系统,图 11~13 分别给出了实验平台、流场飘带显示和风速仪测点。

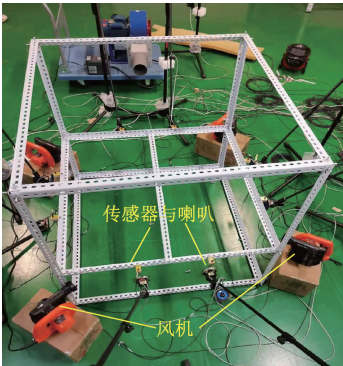


图 11 实验平台

Fig. 11 Experimental platform

表 3 声波测速系统主要硬件设备

Table 3 Hardware equipment of the acoustic velocity measurement system

硬件名称	型号	数量	功能
传感器	BSWA MPA436A	8	接收声波信号
电声喇叭	5 W/8 Ω	8	发射信号
数据采集卡	NI-PXIe9529	1	采集声波信号
功率放大器	BSWA AUDIO AMPLIFIER TA1100	1	放大声波信号
风机	功率: 2 300 W, 风量: 3.8 m ³ /min	4	形成流场
风速计	SMARTAR866A	1	单点测量速度

本文声波测速实验经过分组多次测量得出四角切圆流场的重建结果,并将其与文献[11]和[14]中采用方法的重建结果进行了比较,如图 14 所示。由图中重建流场的结果来看,本文和文献[14]方法的声波测量效果还是比较理想的。重建出的流场分布与飘带显示结果(图 12)相似,呈现为一近似对称的涡流场。涡流分布速度由外向内逐渐减小,在涡流中心速度接近为 0 m/s。而文献[11]方法在流场的中心区域位置重建质量较好,而在流场的四角边缘区域与飘带显示结果偏差较大,重建效果较差。这主要是因为文献[11]在构造投影系统矩

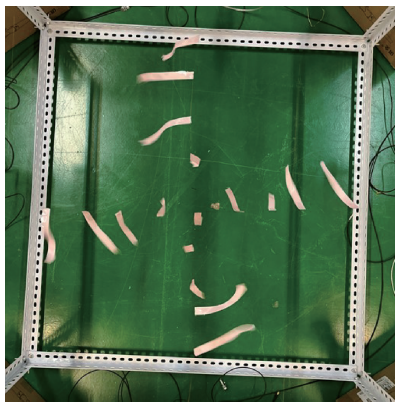


图 12 流场飘带显示

Fig. 12 Strip display of the flow field

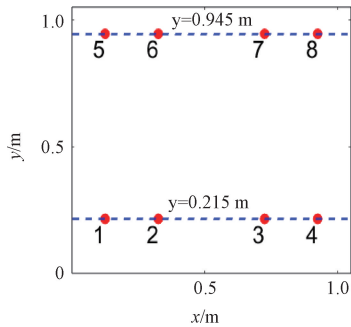


图 13 风速仪测点示意图

Fig. 13 Anemometer measurement points

阵时,边缘声学信息缺失导致的。

为了进一步检验各算法的重建质量,使用风速计进行单点测量,分别测量 $y = 0.215\text{ m}$ 和 $y = 0.945\text{ m}$ 上共 8 个测点的速度大小,8 个风速仪探头位置分别为:测点 1 ($0.125\text{ m}, 0.215\text{ m}$)、测点 2 ($0.325\text{ m}, 0.215\text{ m}$)、测点 3 ($0.725\text{ m}, 0.215\text{ m}$)、测点 4 ($0.924\text{ m}, 0.215\text{ m}$)、测点 5 ($0.125\text{ m}, 0.945\text{ m}$)、测点 6 ($0.325\text{ m}, 0.945\text{ m}$)、测点 7 ($0.725\text{ m}, 0.945\text{ m}$) 和

测点 8 ($0.925\text{ m}, 0.945\text{ m}$),位置示意图如图 13。将风速仪的测量结果与本文 RBF-EO 算法和文献[11]与[14]算法得到声波法速度测量结果进行对比,如图 15 所示。图 15 中曲线分别为 $y = 0.215\text{ m}$ 和 $y = 0.945\text{ m}$ 时声波法所得到的速度值,蓝点为风速仪在 8 个点处所测得的速度大小,通过与风速计测量到的各单点处速度对比,本文和文献[14]声波重建速度的结果与风速仪的检测结果基本吻合,均呈现两端速度较大,中间速度较小的特征。从图 15(c)所示的各算法的相对误差来看,对于本文 RBF-EO 重建算法,测点 2 的重建相对

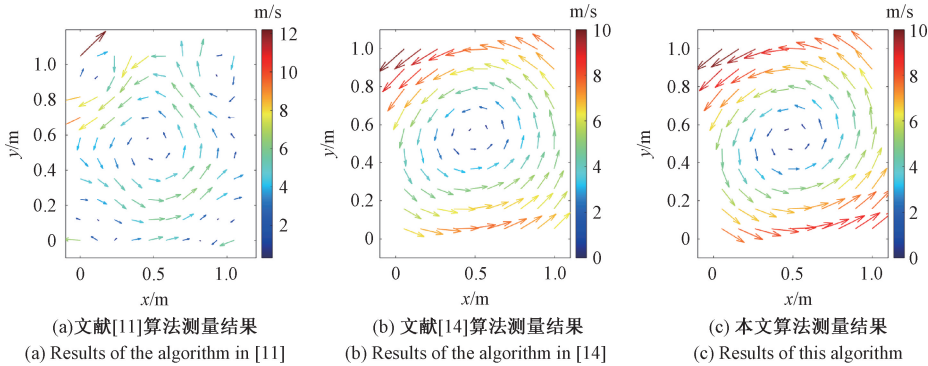


图 14 各重建算法的声波测量结果

Fig. 14 Acoustic measurement results of reconstruction algorithms

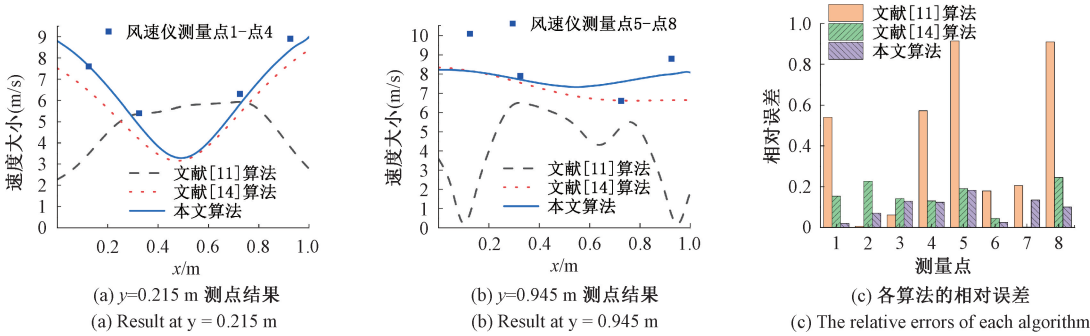


图 15 各重建算法的声波法测量结果与风速仪测量结果对比

Fig. 15 Results comparison between acoustic method and anemometer

误差最大为 18.32%, 在测点 4 的重建误差最小为 2.41%, 整体测点均具有较好的重建质量, 8 个测点的平均相对误差为 9.77%。文献[11]在测点 2 和测点 3 具有较小的重建误差, 而在其余测点的重建误差较大, 尤其在边缘处, 重建误差呈现了较大的波动性。

总之, 与飘带显示和风速计测量结果对比, 本文的 RBF-EO 声波法测量结果可以较为可靠地反映所测区域流场的分布趋势和速度大小。

5 结 论

本文提出的径向基函数逼近和均衡优化算法结合的方法来反演速度场, 设计了声学测速的重建流程, 并对典型的炉内四角切圆流场进行了数值模拟和实验验证, 结论如下:

1) 通过声波法建立径向基函数的速度场模型, 使用均衡优化算法求解了反问题中的不适定方程, 并且对单涡对称和单涡偏斜以及双涡四角切圆流速场进行了数值仿真和实验, 验证了算法的可行性。

2) 将 RBF-EO 重建算法与传统的算法进行了抗噪性分析, 结果表明在不同噪声水平下, 该算法能够很好的反演出速度场, 具有较高的重建质量和良好的抗噪性能。

3) 与飘带显示和风速计测量结果对比, 本文声波法实验测量结果可以较为可靠地反映所测区域流场的分布趋势和速度大小。

4) 提出的基于 RBF-EO 重建算法为炉内烟气流场声学测量提供了理论依据和实验验证, 并为其实际应用提供了指导。同时本文声波测速方法可以推广至航空航天、石油化工、能源动力等应用领域。

参考文献

- [1] 杜钰锋, 林俊, 马护生, 等. 可压缩流体恒温热线风速仪校准方法[J]. 航空学报, 2017, 38(6): 6-13.
DU Y F, LIN J, MA H SH, et al. Calibration method for constant temperature hot-wire anemometer for compressible fluid, *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(6): 6-13.
- [2] ADRIAN R J, YAO C S. Power spectra of fluid velocities measured by laser Doppler velocimetry[J]. *Experiments in Fluids*, 1986, 5(1): 17-28.
- [3] BHATTACHARYA S, VLACHOS P P. Volumetric particle tracking velocimetry (PTV) uncertainty quantification[J]. *Experiments in Fluids*, 2020, 61(9).
- [4] 孔倩, 姜根山, 刘月超, 等. 声学法炉内温度场与速度场协同测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023,

44(4): 249-258.

KONG Q, JIANG G SH, LIU Y CH, et al. Study on simultaneous measurement of temperature and velocity field in furnace based on acoustic tomography[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(4): 249-258.

- [5] ZHANG H T, GUO Y, WANG L M. Transducers layout optimization for acoustic tomography temperature field reconstruction[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2022, 69(4): 1497-1507.
- [6] 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.
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.
- [7] LIU Q, ZHOU B, CHENG R X, et al. Online monitoring instantaneous 2D temperature distributions in a furnace using acoustic tomography based on frequency division multiplexing[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 48: 103176.
- [8] SCHWARZ A. Three-dimensional reconstruction of temperature and velocity fields in a furnace[J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, 1995, 12(2): 75-80.
- [9] JOHNSON S A, GREENLEAF J F, TANAKA M, et al. Reconstructing three-dimensional temperature and fluid velocity vector fields from acoustic transmission measurements[J]. *ISA-Trans*, 1997, 16(3): 3-15.
- [10] VECHERIN S N, OSTASHEV V E, WILSON D K, et al. Time-dependent stochastic inversion in acoustic tomography of the atmosphere with reciprocal sound transmission[J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(12): 125501.
- [11] 王浩源, 王伯雄, 柳建楠, 等. 基于超声层析成像技术的三维流场重建[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(1): 72-75.
WANG H Y, WANG B X, LIU J N, et al. Reconstruction of three dimensional flow field based on ultrasonic tomography technique[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2016, 35(1): 72-75.
- [12] 王亮, 范鹏, 沈国清. 声波法测量炉膛四角切圆速度场重建仿真[J]. 热能动力工程, 2018, 33(6): 83-87.

- WANG L, FAN P, SHEN G Q. Simulation of velocity field reconstruction of four-corner circular circle measurement furnace by acoustic method[J]. Journal of Thermal Energy and Power Engineering, 2018, 33(6): 83-87.
- [13] 沈国清,何寿荣,安连锁,等. 声波法测量电站锅炉烟气流速的实验研究[J]. 动力工程学报, 2015, 35(9): 746-751.
- SHEN G Q, HE SH R, AN L S, et al. Experimental study on the measurement of flue gas velocity in power plant boilers by acoustic wave method[J]. Journal of Power Engineering, 2015, 35(9): 746-751.
- [14] 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.
- [15] ZHANG W, JIANG G SH, SUN J H, et al. Acoustic reconstruction of the vortex field in the nonuniform temperature field of a simulated furnace[J]. Applied Acoustics, 2023, 207: 109334.
- [16] KONG Q, LU Y, JIANG G SH, 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.
- [17] 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.
- 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.
- [18] KONG Q, JIANG G SH, LIU Y CH, et al. Numerical and experimental study on temperature field reconstruction based on acoustic tomography[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 114: 720.
- [19] AFSHIN F, MOHAMMAD H, BRENT S, et al. Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm[J]. Knowledge-Based Systems, 2020, 191(5): 105190.
- [20] ATHA R, RAJAN A, MALLICK S. An enhanced equilibrium optimizer for solving complex optimization problems[J]. Information Sciences, 2024, 660: 120077.
- [21] 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.

作者简介



孔倩(通信作者), 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和声源定位。

E-mail: qiankongkong@126.com

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



赵义豪, 2022 年于河南城建学院获得学士学位, 现为华北电力大学硕士研究生, 主要研究方向为声波信号处理和声波层析成像方法。

E-mail: 983545619@qq.com

Zhao Yihao received his B. Sc. degree from Henan Urban Construction College in 2022, Now he is a M. Sc. candidate in North China Electric Power University. His main research interests include acoustic signal processing and acoustic tomography.



姜根山, 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: gsjiang@ncepu.edu.cn

Jiang Genshan received his B. Sc. degree in 1983 from North China Electric Power University, received his M. Sc. degree in 1989 from Harbin Institute of Technology, received his Ph. D. degree in 2006 from North China Electric Power University. Now he is a professor in North China Electric Power University. His main research interest includes acoustic method in boiler.