

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.02.06

复杂流场超声测速重建算法研究进展与展望

李鑫昊, 王毅*, 张淑婷

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 介绍了主流超声测速方法, 分别阐述了时差法、多普勒法的基本原理、计算公式, 并聚焦于超声速度场重建中有病态特性的逆问题, 深入剖析了最小二乘法、Tikhonov正则化、截断奇异值分解等经典反演算法的机理, 对比分析了各算法的优势及不足。重点总结了应对高声速漂移与低信噪比的物理-信号联合处理策略, 指出融合物理先验的深度学习、计算流体力学-声学仿真耦合及系统芯片化是推动复杂流场超声测速重建技术向高精度、自适应、微型化发展的核心方向, 为该技术的进一步突破与工程化应用提供参考。

关键词: 畸变流场; 超声测速; 重建算法; 时差法; 多普勒法; 最小二乘法; Tikhonov正则化; 航空发动机

中图分类号: TB934; TB55; V21 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2026) 02-0078-12

Research progress and prospects of ultrasonic velocimetry reconstruction algorithms for complex flow fields

LI Xinhao, WANG Yi*, ZHANG Shuting

(AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: This paper introduces mainstream ultrasonic velocity measurement methods, and details the fundamental principles and calculation formulas of the transit-time method and the Doppler method. It focuses particularly on the ill-posed inverse problem inherent in ultrasonic velocity field reconstruction, and provides an in-depth analysis of the mechanisms, strengths, and inherent ill-posedness of classical inversion algorithms including the least squares method, Tikhonov regularization, and truncated singular value decomposition (TSVD). The paper summarizes key physical-signal joint processing strategies for mitigating significant ultrasonic beam drift and low signal-to-noise ratio (SNR). Prospectively, it proposes that the integration of physics-informed deep learning, computational fluid dynamics (CFD)-acoustics simulation coupling, and system-on-chip integration are core directions for advancing the technology towards high precision, adaptability, and miniaturization. This work aims to provide a reference for further breakthroughs and the engineering application of ultrasonic velocity measurement technology.

Key words: distorted flow field; ultrasonic velocimetry; reconstruction algorithm; transit-time method; Doppler method; least squares method; Tikhonov regularization; aero-engine

收稿日期: 2025-12-03; 修回日期: 2025-12-29; 录用日期: 2026-01-14; 发表日期: 2026-04-28

基金项目: 中国航发集团资助项目(2022YFF0610805)

引用格式: 李鑫昊, 王毅, 张淑婷. 复杂流场超声测速重建算法研究进展与展望[J]. 计测技术, 2026, 46(2): 78-89.

Citation: LI X H, WANG Y, ZHANG S T. Research progress and prospects of ultrasonic velocimetry reconstruction algorithms for complex flow fields[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(2): 78-89.



0 引言

速度是确定介质状态最重要的参数之一。在航空航天、工业流程与环境监测等领域,对气体流速,尤其是非均匀、畸变流场速度分布的精确测量,是进行发动机设计、飞行器性能评估、污染物扩散分析和能源效率管理的重要基础。

根据速度传感器与被测介质是否接触,速度场测量方法可分为接触式和非接触式两类。传统的流速测量方法,如皮托管和热线/热膜风速仪,属于接触式测量。皮托管结构简单但存在明显的节流压力损失,且在低流速(例如低于2 m/s)条件下的灵敏度显著下降,难以捕捉动态变化的流场细节。接触式测量速度场方法存在节流压力损失和流体对测量元件的冲击问题,从而增加测量误差。更为关键的是,上述接触式方法通常只能提供“点”速度,若要获取复杂空间的速度场分布,则需部署密集传感器阵列(插耙测量),这不仅会严重干扰原始流场,还面临着分布点过疏导致分辨力不足、系统过于复杂等固有矛盾。

随着科学技术的发展,对于熔铸炉膛^[1]、异型飞机进气道等复杂环境速度测量的要求越来越高。上述环境具有以下共同点:待测物体处于特殊介质环境中;待测物体处于封闭空间内部或因交界面流动复杂,容易产生畸变非均匀流场而不能直接进行接触式测速;测速环境受到电磁或辐射干扰。在这些情况下,接触式测速方法很难有效发挥作用,需要采用非接触式测速方法。非接触式测量方法主要分为激光法和声学法,其中激光法主要包括激光多普勒测速仪技术^[2]、相位多普勒粒子动态分析仪技术、粒子图像测速技术^[3]与激光吸收光谱技术^[4]。激光技术都要求被测介质相对于激光波长是透明或半透明的。在充满烟雾、灰尘、水滴、高浓度颗粒物或火焰的环境中,激光会被严重散射和衰减,导致信号急剧减弱甚至完全失效,这一局限性使得光学方法在许多“视觉不透明”的关键场合难以应用。

在此背景下,声学测速技术,特别是超声波测速法,展现出其独特的优势。超声波测速法利用超声波在流体中传播的物理特性受流动调制的关系来反演流速。该方法本质上是非接触的,几

乎不引入压力损失;无需使用任何移动部件,可靠性高、维护成本低;通过多声道配置,能够基于有限的路径测量数据重建出截面的二维速度场分布,为解决传统方法在复杂流场中面临的困境提供了强有力的技术途径。随着现代电子技术与数字信号处理算法的飞速发展,超声测速技术在测量精度、量程范围和实时性方面取得了长足进步,其应用已从最初的水下探测扩展到工业计量、气象观测及发动机进气监测等诸多领域。

本文着眼于声学测速技术的基本原理、发展现状及超声速度场重建算法,重点聚焦于超声速度场重建这一核心逆问题,深入分析最小二乘法、正则化方法、截断奇异值分解(truncated singular value decomposition, TSVD)等主流重建算法的数学原理与应对病态性问题的策略。在剖析当前技术面临的主要挑战的基础上,对未来融合智能算法、多物理场仿真与芯片化集成的技术发展趋势进行总结与展望,为推动该技术的进一步突破与工程化应用提供参考。

1 超声测速技术概述

1912年, FESSENDEN R A^[5]发明了水下声波换能器,利用声波在水中的传播特性来检测和测量水下对象。1928年, RUTTEN^[6]基于多普勒效应,利用声波在流体中传播时的速度变化来计算流体速度。1929年, HARTING 和 WILCOX^[7]开展合作,设计了单声道超声流量计。1950年, GRAY J W^[8]提出使用时差法来测量气体流速,为之后基于时差法气体流量计的研发与制作奠定了基础。20世纪80年代之后,随着超声波数字技术的出现和发展,超声波模拟技术逐渐被替代。人们通过各种技术的应用,进一步提高了超声波流量计在流量测量时的准确度,相关产品的种类和数量逐渐增加,在各个领域的应用比重也在慢慢增大。

经过多代发展更新,超声测速技术已经得到广泛应用。根据测速原理差异,目前主流的超声测速方法可分为:时差法、多普勒效应法、波速偏移法和相关法。

时差法的物理原理:利用超声波在气体流场中的顺逆流传播时间差来逆推出流场的速度。超声波信号在流体中传播的速度会受流体运动的影

响。超声波测速装置通常装有2个超声波传感器，分别位于流体传输管道的对角线两端。这2个传感器既能发射超声波信号，也能接收超声波信号。一个传感器发射的超声波沿着流动方向传播(顺流方向)，而另一个传感器发射的超声波则沿着与流动方向相反的方向传播(逆流方向)，如图1所示。当流体静止时，超声波顺流和逆流的传播时间是相同的；当流体移动时，顺流方向的超声波传播时间会短于逆流方向的传播时间。测速装置通过精确测量这2个方向上的传播时间差，即可计算出流体流速。

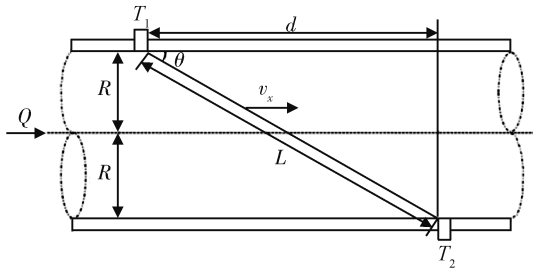


图1 时差法原理图

Fig.1 Principle diagram of transit-time method

图1中， d 为2个传感器的轴向间距， L 为超声声道长， c_0 为超声波在静止介质中的传播速度， v_x 为声道线平均轴向速度， Q 为流量， θ 为传感器安装角度。 T_1 为超声波的顺流传播时间， T_2 为逆流传播时间， T_1 、 T_2 分别为

$$T_1 = L / (c_0 + v_x \cos \theta) \quad (1)$$

$$T_2 = L / (c_0 - v_x \cos \theta) \quad (2)$$

联立式(1)和式(2)，消除 c_0 后得到

$$v_x = \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (3)$$

多普勒效应法主要用于测量含有悬浮颗粒或气泡的流体的流速，当声波或光波源相对于观察者移动时，接收到的波频率会发生变化，如图2所

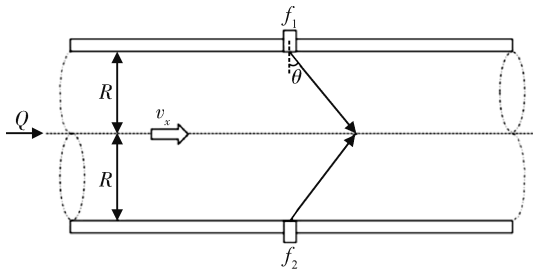


图2 多普勒法原理图

Fig.2 Principle diagram of Doppler method

示。多普勒效应法的物理原理：通过一个超声波发射器向流体发射声波，这些声波在流体中传播时会被流体中的悬浮颗粒或气泡(杂质)散射或反射。(如果流体向发射器或从发射器方向流动，那么反射或散射回来的声波频率会由于多普勒效应而发生变化。如果流体向探头移动，反射波的频率会增大；如果流体远离探头移动，频率会减小。)流量计测量返回声波的频率，并将其与原始发射频率进行比较，从而计算出频率的变化量。可以通过这种频率变化直接计算流速，因为频率的变化与流体速度成正比。

反射原理公式为

$$f_2 - f_1 = \frac{2v_x f_1 \sin \theta}{c} \quad (4)$$

式中： f_1 为传感器1的频率， f_2 为传感器2的频率， c 为声波在流体中的传播速度。

流体的流速公式为

$$v_x = c(f_2 - f_1) / (2f_1 \sin \theta) \quad (5)$$

根据 v_x 以及管道管径可求得体积流量。若知道流体密度，可计算得出质量流量。由式(5)可知：管道中流量的测量与流体中的超声波传播速度相关，而超声波在流体中的传播速度受温度影响较大，因此多普勒测量易受温度的影响。

波速偏移法与时差法相似，只是关注点在于超声波的绝对传播速度的变化，而不是测量顺流和逆流方向上的时间差。相关法依赖于统计信号处理技术来分析和解释流体中超声波信号的特征。这种方法可以精确地检测流体中超声波信号的时间延迟，从而计算流速。主流超声测速方法对比见表1。

2 超声速度场重建算法研究现状

受限于超声传输过程追踪和相应重建算法实现的困难，以及协同重建过程中，由于多物理量场相互耦合关联导致的高度欠定和严重病态问题，基于超声层析的速度场实时准确测量仍然是一项亟待解决的难题^[9]。

2.1 重建问题的数学描述

超声速度场重建的本质是一个典型的逆问题。其数学描述从声学物理定律出发，通过定义“正问题”来建立测量值与待求场之间的关系，进而明确“逆问题”的目标与挑战。“正问题”的核心

表1 主流超声测速方法对比

Tab.1 Comparison of main ultrasonic velocity measurement methods

方法	核心参量	优势	局限性
时差法	传播时间	测量精度高, 不受散射粒子影响	依赖高精度时间测量电路, 在低流速下信噪比较低、存在声速漂移效应
多普勒法	频率	对管道振动不敏感, 安装简便	测量精度依赖于散射粒子浓度与粒径分布, 对温度敏感, 在纯净流体中无法工作
波速偏移法	声速	原理简单, 无需配对安装换能器, 对流速变化敏感	测量精度受温度、压力、成分影响极大, 难以补偿, 实用性较差, 很少用于工业精确计量
相关法	时间延迟	抗干扰能力强, 不依赖流道精确几何尺寸	需要流体自身存在足够的随机波动特性, 系统动态响应较慢, 实时性较差

是已知速度场分布, 预测超声波的传播时间; 而“逆问题”则是根据已知的超声波传播时间反演求解速度场。将“逆问题”在离散形式下归结为求解线性系统, 即

$$\Delta t = A_x u \quad (6)$$

式中: Δt 为所有有效路径的声波传播时间差测量量; A_x 为投影矩阵, 其与换能器的位置、数量还有网格划分方式相关; u 为待求的离散化速度场。

求解这个“逆问题”面临的挑战主要表现为三方面: ① 为了保持较好的时间分辨力, 通常射线路径的数量远小于待重建的场参数数量, 这样会使得方程可能有很多解, 同时系统欠定性; ② 在求解时, 矩阵 A_x 的条件数很大, 意味着测量 Δt 时存在的微小噪声或误差会导致速度场的解发生巨大的、非物理的振荡, 最后导致系统病态性; ③ 基于直线路径的简化模型计算投影矩阵, 丢失了流速场垂直于射线方向的分量信息, 单一方向的测量本质上无法获取流体内部旋转运动的完整信息。

2.2 重建算法发展和分析

在测量区域内, 通过声波发射/接收器测量多条路径的往返传播时间差, 然后依据声速与传播时间差和空气流速的关系, 应用反问题求解技术来重建测量区域的速度场。

重建速度场的方法有许多种, 例如: 最小二乘法^[10-13]、基于二维余弦函数的傅里叶级数展开的正则化方法^[14-15]、基于划分几何像素的级数展开的正则化方法^[12]、基于高斯函数展开的正则化方法^[14]、基于修正 Landweber 迭代的方法^[16]、基于级数展开的代数重建算法^[17]等。其中, 最小二乘法是最简单、最直观的一种重建还原方法。为了提

高重建速度场的精度以及抗干扰的能力, 在使用有限级数展开法重建速度场的过程中, 可加入速度场分布的先验信息, 即引入正则化, 但是这种算法的缺点是边缘效应较严重, 等速线不连续, 甚至出现等速线与边界正交的现象, 故研究的重点是综合考虑各种算法的优缺点, 以寻找合适的重建算法, 利用其他方法来补偿算法的弊端。

2.2.1 最小二乘法

最小二乘法基本过程: 在待测速度场区域的四周安装若干用于发射/接收声波的换能器, 同时将待测区域划分为若干个小区域, 然后测出声波在 2 个声波换能器之间的往返传播时间差, 利用传播时间差和流体流速的函数关系, 间接地计算得到待测速度场的速度分布。但是, 当划分的网格数大于测得的不同路径的声波传播时间个数时, 应用最小二乘法会导致矩阵奇异而无法求逆, 无法准确还原速度场。同时, 当测得的传播时间数据稀少时, 重建精度受到很大限制, 并且对于重建待测速度场的边缘速度分布, 要给出边界速度值, 也极为不便。

测量速度分布时, 假设被测区域为圆形, 在其周围布置多个声波发射/接收装置。将测量的区域空间划分为 n 个立体网格, 各个网格中空气的平均速度分别为 $V_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。在测量区域的环带分别布置多个声波发射和接收装置。对于圆形测量区域, 考虑传感器角度限制, 因此去除相邻传感器的传播路径, 最终形成了 20 条声波传播路径。一种声学测量路径及测量空间区域立体网格划分如图 3 所示, S1 至 S8 为探头, 测量区域中的彩色线为声学测量路径。

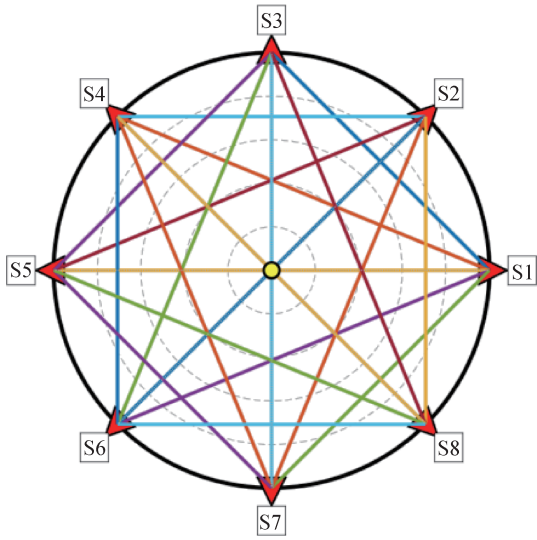


图3 声学测量路径及测量区域网格划分

Fig.3 Acoustic measurement path and grid division of measurement area

为获得速度场分布，首先需要计算声波沿第 k 条路径的传播时间差 Δt_k 可表示为

$$\Delta t_k = \sum_{i=1}^n a_{ki} v_i \quad (7)$$

式中： v_i 为第 i 个立体网格内声波的平均垂向速度； $a_{ki} = -\frac{2\cos\theta_{ki}}{c^2} L_{ki}$ ， θ_{ki} 为第 i 个网格内第 k 条路径与 z 方向的夹角， c 为声速， L_{ki} 为第 k ($k = 1, 2, \dots, m$) 条路径通过第 i 个立体网格的长度。

声波传播时间差的实测值 $\Delta \tau_k$ 与 Δt_k 之差 ε_k 为

$$\varepsilon_k = \Delta \tau_k - \Delta t_k = \Delta \tau_k - \sum_{i=1}^n a_{ki} v_i \quad (8)$$

最小二乘法是令方程式的平方和为最小，即

$$\frac{\partial}{\partial v_i} \sum_{k=1}^m (\Delta \tau_k - \sum_{i=1}^n a_{ki} v_i)^2 = 0 \quad (9)$$

得到方程

$$A^T \cdot A \cdot V = A^T \cdot t \quad (10)$$

式中： V 为速度矩阵， $V = (v_1, \dots, v_n)^T$ ； t 为时间矩阵， $t = (\Delta t_1, \dots, \Delta t_n)^T$ ，其中， $\Delta t_n = \int -\frac{2v}{c^2} dl$ ， v 为速度， dl 为声波传播路径的微分； A 为 $m \times n$ 矩阵， $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$ 。

为保证方程有解，应确保 $m \geq n$ ，即声波传播路径的数目必须大于或等于空间划分的立体网格的数目。与此同时，任意两条声波传播路径经过的立体网格应至少有一个不同，每一个立体网格

里应至少有一条路径经过，以此来保证每个立体网格的速度信息在方程组中至少会出现一次。方程的解为

$$V = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot t \quad (11)$$

这样，便求出了每个立体网格的空间特性，即声波在该立体网格内传播时的垂向速度，并作为该区域几何中心点的速度，再利用插值算法即可得到速度场。

综上所述，应用最小二乘法重建速度场时，求解得到划分的各个立体网格内的平均垂向速度，然后在这些速度数据的基础上，利用插值算法将其扩展到整个区域从而得到近似速度场分布。速度场的重建精度取决于 V 中所含元素的多少，换言之，取决于所划分区域的多少。矩阵 A 的组成元素与声波路径经过每个立体网格的长度、路径与垂向的夹角以及声速有关，而这些元素的变化主要由换能器数目、布放位置及待测速度场区域的划分方式决定。

此前，日本 Gifu 大学的 LU J^[18] 等人的理论研究表明：受温度梯度的影响，声波传播路径会发生改变，进而产生测量误差，可采用最小二乘法和迭代技术提高重建精度。东北大学的田丰等人^[19] 在应用最小二乘法的基础上，提出了正则化及正则化与迭代方法相结合的方法，可以提高重建精度。

2.2.2 傅里叶正则化

意大利 Pisa 大学的 BRAMANTI M 等人^[20-21] 提出了应用傅里叶正则化方法的图像重建算法。假设待测区域某一“典型层面”的速度分布图像可以用一个连续的函数 $f(x, y)$ 来表示，则待测区域四周任意一对有效的声波发射器/接收器之间的声波往返传播时间差，可以由函数 $f(x, y)$ 沿该声波传播路径 l_k 的线积分来表示，即

$$\Delta t_k = \int_{l_k} -\frac{2v}{c^2} dl_k = \int_{l_k} f(x, y) dl_k, \quad k = 1, 2, \dots, N_d \quad (12)$$

式中： l_k 为第 k 条声波飞行时间路径， N_d 为声波传播时间的路径数， $f(x, y) = -\frac{2v}{\cos\theta c^2}$ 。

在实际测量时，声波沿声波路径的传播时间差、夹角 θ 都可通过测量而得到，垂向流速可通过计算函数 $f(x, y)$ 而得出，故可绘制出速度场分布图。

将 $f(x, y)$ 离散化，并将其近似表示成一系列

有限维的基函数的叠加, 即

$$f(x, y) = \sum_{m=1}^{N_p} a_m h_m(x, y) \quad (13)$$

式中: a_m 为待定系数, $h_m(x, y)$ 为一系列有限维的连续的基函数, N_p 为基函数的个数。

在忽略噪声的影响时, 可由式(13)计算得到函数 $f(x, y)$, 但是因为 a_m 是病态的, 此时估算出的 $f(x, y)$ 有极强的噪声敏感性。降低噪声的敏感性, 可以通过函数 $f(x, y)$ 的先验知识和噪声统计规律应用正则化理论来实现。目前已利用正则化理论在电站燃煤锅炉烟道内进行烟气温度及流速测量^[22]以及对深海热液口进行探索与观测^[23]。但是正则化参数选取依赖于经验, 缺乏普适性准则, 而且通常情况下该方法的计算复杂度相较最小二乘法更高。

2.2.3 改进的 Tikhonov 正则化

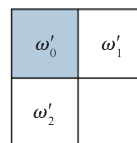
当超声换能器数据充分、布置合理时, 以上方法均可以实现速度场的重建, 但往往实际测量时总会出现个别数据无效、信号丢失和接收噪声干扰。对于稀疏的有效数据, 张居奇^[9]提出了改进的 Tikhonov 正则化方法。投影矩阵的条件数随着未知参数数量的增加而增加, 其病态性也随之增加, 最终导致欠定性。这种情况的最小二乘解不是有意义的近似, 在反问题求解时, 作为高通滤波器的反映算子具有放大噪声的不良倾向, 故引入 Tikhonov 正则化, 通过在主对角线上增加正值元素来减少近奇异矩阵的条件数, 降低范数和残差的影响, 公式为

$$F = \min \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \gamma \cdot \mathbf{\Gamma} \end{bmatrix} \omega - \begin{bmatrix} \Delta t \\ 0 \end{bmatrix} \right\|_2 \quad (14)$$

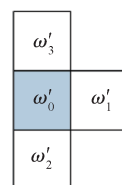
式中: F 为计算函数; \mathbf{B} 为前文矩阵 \mathbf{A} 的投影矩阵, 描述了声波传播路径与离散化网格之间的几何和物理关系; γ 为平衡目标函数中残差范数和解范数的正则化参数, 该参数在重建过程中起平衡解范数和残差范数的重要作用; $\mathbf{\Gamma}$ 为拉普拉斯正则化矩阵, 利用拉普拉斯正则化矩阵对未知参数进行微分, 从而缓解问题的不适定性。标准正则化时, 选取 $\mathbf{\Gamma} = \mathbf{I}$ (\mathbf{I} 为单位矩阵), 但是由于此时矩阵 \mathbf{B} 存在病态性, 需进行矩阵改进, 添加第 i 个网格与其他网格之间的物理约束。此时正则化矩阵 $\mathbf{\Gamma}$ 中的元素 Γ_{ij} 定义为

$$\Gamma_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } i = j \\ -\frac{1}{n_i}, & \text{if } j \text{ neighbors } i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

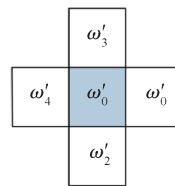
式中: n_i 为与第 i 个网格相邻的网格数。 $\mathbf{\Gamma}$ 的每一行之和为 0。在二维空间内共有 3 种类型的网格相邻关系, 如图 4 所示。



(a) 四个角上的网格与其相邻网格
(a) Corner grids and their adjacent counterparts



(b) 四条棱上的网格与其相邻网格
(b) Edge grids and their adjacent counterparts



(c) 剩下所有内部的网格与其相邻网格
(c) All remaining interior grids and their adjacent counterparts

图 4 三种网格相邻关系

Fig.4 Three types of grid adjacency relationships

针对流场中常见的局部突变、边缘不连续等特征, 稀疏正则化方法通过引入稀疏性先验, 提升重建结果对局部结构的辨识能力。其中, L1 正则化通过最小化模型参数的 L1 范数, 促使解向量中部分元素为零, 适用于识别局部高速区或剪切层。全变分正则化则通过惩罚速度场的梯度幅值, 保持边缘锐利, 常用于涡街、激波等具有清晰界面的流场重建。

近年来, 稀疏表示正则化逐渐受到关注, 其假设速度场可在小波^[24]、曲波等多尺度基函数下稀疏表示, 适用于多尺度湍流场重建。稀疏正则化方法的优势在于能显著提升边缘保持能力, 避免传统 Tikhonov 正则化的过平滑现象。然而, 其优

化问题通常非光滑,求解算法计算复杂度较高,且正则化参数的选择对结果影响显著。

2.2.4 奇异值分解截断法

对于消除病态问题,还有一种思路是传递函数的奇异值分解截断法^[25]。当式(6)中 A_x 病态时,最小二乘法解不可靠,为求得稳定的估值,必须设法削弱系数阵的病态性以便获得稳定、可靠的解。 \bar{A} 为与换能器的位置、数量还有网格划分方式相关的投影矩阵,将 \bar{A} 作为奇异值分解,得

$$\bar{A} = U\Sigma V_R^T \quad (16)$$

式中: $U \in R^{m \times m}$ 和 $V_R \in R^{n \times n}$ 均为正交矩阵; $\Sigma \in R^{m \times n}$, $\Sigma = \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix}$, D 为 $n \times n$ 阶对角阵,其对角元为 \bar{A} 的奇异值。以常用的最小二乘法的函数模型为例,说明该方法的原理,数学公式为

$$L - e_l = (A_R - E_A)X \quad (17)$$

式中: L 、 e_l 分别为观测向量和误差向量, A_R 、 E_A 分别为系数矩阵及其误差矩阵, X 为待估参数。设 $X = X_0 + \hat{x}$,其中, X_0 为参数的近似估值, \hat{x} 为改正数,代入式(17)得

$$L - e_l = (A_R - E_A)(X_0 + \hat{x}) \quad (18)$$

忽略二阶小量,可得

$$L - A_R X_0 = A \hat{x} + e_l - E_A X_0 \quad (19)$$

令 $\bar{\Xi} = L - A_R X_0$, $e = e_l - E_A X_0$,则

$$\bar{\Xi} = A_R \hat{x} + e \quad (20)$$

分解作谱展开结果 \widehat{x}_{LS} 为

$$\widehat{x}_{LS} = \sum_{i=1}^n \frac{v_i u_i^T}{\lambda_i} \bar{\Xi} \quad (21)$$

式中: u_i 和 v_i 为 U 和 V_R 的第 i 列向量; λ_i 为 \bar{A} 的第 i 个奇异值。截断奇异值法的原理为将传递矩阵中较小的奇异值删除,增大传递矩阵条件数以削弱其病态性,并降低小奇异值在反演中造成大误差的影响。假设将后 $n - k$ 个部分值截断,则解更新为 \widehat{x}_T ,公式为

$$\widehat{x}_T = \sum_{i=1}^J \frac{v_i u_i^T}{\lambda_i} \bar{\Xi} \quad (22)$$

式中: J 为截断点,其大小会直接影响重建后的结果。当 J 较大时,正则效果小,条件数较大,对误差仍较敏感;当 J 较小时,会丢失有效数据,对重建也相对不利,所以后续将研究如何更合理科学地选择 J 值。目前,Tikhonov正则化方法已应用于流动气溶胶动态光散射(Dynamic Light Scattering,

DLS)粒度反演。研究人员提出一种总体最小二乘Tikhonov-TV混合正则化DLS反演方法,该方法融合了总体最小二乘,能够兼顾系数矩阵与相关函数误差,将Tikhonov与抗噪性能强的全变差正则化结合,双重降低了反演方程的病态性以及噪声的影响,提高了反演精度^[26]。截断奇异值方法也应用于场点声压重建结构表面振动速度,研究人员针对求逆过程中的不适定性,采用截断奇异值法对传递矩阵正则化,通过广义交叉检验法选择正则参数,对比分析了测量场点的场点数、测量面大小、测量面与结构表面的距离三个影响因素对重建结果的影响^[27]。除此之外,这种方法还被用于地震数据反演^[28],通过降低速度增量矩阵的秩,获得一个截断矩阵(近似原始矩阵),从而实现噪声数据的截断,截断范围由加权截断核范数正则化控制。利用随机奇异值分解加权截断核范数正则化与全波形反演的结合成为一种有效的成像策略。

改进方法虽有效稳定了求解过程,但其性能严重依赖于正则化参数的选取。虽然存在 L 曲线、广义交叉验证等选取准则,但缺乏普适性的参数确定方法仍是其在实际应用中面对的主要障碍。此外,传统的Tikhonov正则化方法倾向于产生“过光滑”的解,可能会抹平真实的流场陡变边界。

重建算法在涡流场中的重建效果对比如图5所示。可以看出,最小二乘法无法识别涡心导致重建失真;Tikhonov正则化虽平滑噪声,但在涡流边缘处出现“过平滑”现象;TSVD在高频噪声抑制方面表现突出,但在低频信息保留上略显不足;傅里叶正则化在周期性流场中重建效果最佳,但在非周期性边界处出现明显环形伪影,结构扭曲。重建算法特点对比如表2所示。

3 超声测速技术面临的挑战与发展趋势

超声测速技术凭借其非接触、无压损、适用复杂工况等独特优势,已成为流速测量,尤其是大管径气体流量监测领域的关键手段。超声测速方法的发展历程是一个通过技术创新不断应对物理挑战的过程,但目前仍然存在很多限制其发展的问题。

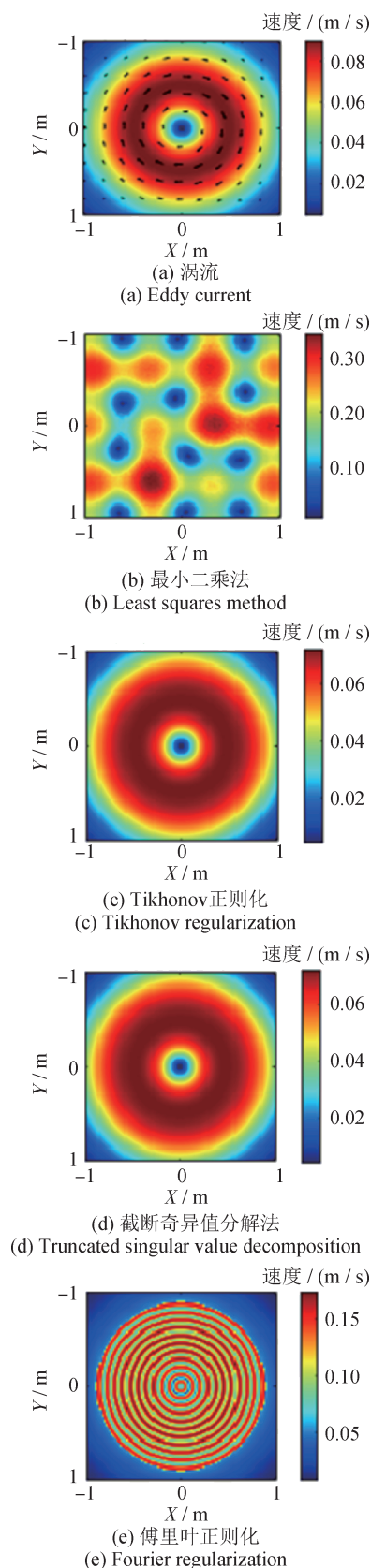


图5 重建算法在涡流场中的重建效果对比

Fig.5 Comparative study of reconstruction algorithms in vortex flow fields

3.1 当前存在的问题与挑战

首先在高流速大管径条件下, 气流对超声波产生显著的“携带效应”^[29], 导致声束路径偏转, 严重影响了测量精度, 同时由于距离远, 压电换能器与气体介质之间巨大的声阻抗差异, 导致绝大部分声波能量被反射, 发射效率极低。而且, 声波频率越高, 在介质中被吸收而衰减的程度越大, 复杂流场下难免会产生高湍流、强剪切、多相流等现象。高速气体产生高速湍流, 会产生强烈的宽频带流体动力学噪声, 极易淹没传统的连续波超声信号, 在嘈杂环境中精确提取有效信号极其困难。剪切流的速度梯度会引发声速梯度, 使超声束沿传播方向持续折射, 路径弯曲程度随剪切强度增大而增加, 若重建算法仍采用直线路径假设, 会导致流速计算出现系统性偏差, 并且误差随剪切梯度增大而上升。多相流中含有的颗粒、气泡等分散相, 会对超声波产生强烈散射和吸收, 导致超声信号幅值急剧衰减, 传播距离大幅缩短, 尤其在高浓度多相流中, 可能出现信号完全丢失的现象。

为应对这些挑战, 涌现出诸多有效的技术方案。针对声束漂移现象, 可以引入“射线救援角”, 通过将换能器轴线与声道线偏置一个微小角度, 预先补偿声束的漂移, 确保在高流速下声波能被有效接收。复杂的温度-速度耦合也会引起声波路径的显著弯曲, 影响测量精度。文献[30]提出一种三角形射线追踪方法, 以准确追踪声波路径。对于大管径和声阻抗导致的信号衰弱, 可以通过发射高压脉冲^[31]以提高超声波能量, 增强超声波对介质的穿透性, 在此基础上还可以优化接收电路, 增强测量系统的可靠性。针对信噪比问题, 可以采用线性调频与脉冲压缩技术, 发射一个频率随时间变化的信号, 在接收端通过相关处理将其压缩为一个尖锐的脉冲峰值, 该峰值能有效“刺穿”噪声屏障, 提供极高的处理增益和精确的到达时间判断; 也可以根据超声波换能器与电路、被测介质的相互关系, 对超声波换能器进行电声匹配, 使换能器的频带变宽, 从而减小插入损耗, 提高信噪比。传统超声测速模型在多相流中不再适用, 需基于多相流物理规律修正模型假设混合声速与声波折射修正来应对。

表2 重建算法特点对比
Tab.2 Comparison of reconstruction algorithms

方法	核心思想	优势	局限性	计算效率	抗噪能力	边界条件敏感性	适用流场
最小二乘法	最小化误差平方和	简单直观, 计算快速	面对病态问题时效果不稳定	高	弱	高	较均匀
Tikhonov 正则化	引入正则项抑制噪声	增强稳定性, 抗噪声能力提升	参数选择依赖经验, 易出现过平滑	中	强	依靠正则化项约束	存在平滑先验的流场
截断奇异值分解	截断小奇异值降低噪声放大程度	有效抑制高频噪声, 数值稳定	截断点选择困难, 信息容易丢失	中	强	中	需抑制高频噪声的流场
傅里叶正则化	基于频域展开与平滑	适合周期性场, 频域控制灵活	边缘效应明显, 依赖基函数选择	中	中	高	具有周期性特征的流场

3.2 未来发展趋势

展望未来, 超声测速技术的突破将依赖于声学物理、先进算法、系统集成与多物理场知识的深度融合。

3.2.1 算法融合

2021年, ZHANG J Q等人^[32]通过协方差矩阵自适应进化策略(Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy, CMA-ES)算法、模拟退火和遗传算法, 基于非线性声学断层扫描(Nonlinear Acoustic Tomography, NAT)同时重建温度场和速度场。深度学习技术为病态逆问题的求解提供了全新的范式。现有大多数研究仅限于矩形区域中速度场的重建, 圆形区域中速度场重建的研究非常少, 主要原因是声学换能器的布局、声学路径的选择以及测量区域的划分在圆形区域中比矩形区域更为困难。2024年, CHEN Y X等人^[33]基于声学断层扫描结合马尔可夫函数和奇异值分解的重构算法, 提出一种用于圆形区域速度场重建的测量区域划分优化算法, 通过模型速度场和模拟速度场的重建实验, 验证了算法的重建效应和抗干涉能力。算法融合在利用各算法优势的同时可能提高计算的复杂性。2024年, DUAN Y X等人^[34]构建了声温场重建模拟数据集, 引入温度场残差校正网络, 结合轻量化网络架构与训练策略, 在降低误差的同时保持温度场的平滑性符合要求, 该数据集可与多种传统算法集成, 在速度场和温度场重建方面具有通用性。

3.2.2 多物理场耦合

纯数据驱动的深度学习模型可能输出不满足

物理定律的结果, 这种方法的模型泛化能力存在一定局限性, 纯数据驱动模型严重依赖训练数据的分布, 当流场条件超出训练集范围时, 重建性能可能急剧下降。为解决此问题, RAISSI M等人^[35]提出了物理知情神经网络——用于解决涉及非线性偏微分方程的正向和逆问题的深度学习框架。其次, 物理一致性缺失会导致网络可能输出违背声波传播物理定律的结果, 尤其在数据稀疏区域。2023年, ZHU Y Z等人^[36]成功地将物理信息神经网络(Physics-Informed Neural Networks, PINNs)框架应用于声学旅行时层析成像, 研究表明: 该模型仅需少量实测数据, 再结合物理方程的约束, 即可有效补偿测量信息的不足, 显著提升在流场复杂区域的重建性能, 并展现出优于纯数据驱动模型的泛化能力, 代表了当前最前沿的研究趋势。2025年, KONG Q等人^[37]建立了一个多物理声学重建模型, 其基于径向基函数神经网络实现。该研究团队首先开发基于径向基函数神经网络的增强模型, 专门用于重建声波传播路径上的温度场和速度场, 并对模型参数进行优化, 最后对炉内的代表性物理场模型进行数值模拟, 并将结果与传统重建算法(如Tikhonov正则化和截断奇异值分解)进行比较, 分析表明: 该方法具有更好的适应性、更强的抗噪能力、更短的时间消耗和更高的精度。但是该方法的实时性约束苛刻, 分析复杂、大量的参数时, 耗时较长, 难以满足发动机监测、过程控制等场景的毫秒级实时响应要求。

3.2.3 系统集成

传统的温度场重建算法虽然有效, 但仍存在

计算复杂度高、连续误差累积和参数敏感性强等问题。为克服这些限制,2025年,CHEN L W等人^[38]提出了快速响应温度场重建网络。该网络集成特征提取编码器和多尺度注意力增强重建模块,结合一种生成路径-时间输入矩阵的方法,将测量数据转换为三维格式,提升了数据处理效率。该方法避免了复杂的传统数学处理和依赖经验的参数选择过程,在提高重建准确性的同时,显著提升了计算速度。系统集成化与芯片化是超声技术走向工程应用的必然要求,其核心挑战是在微型化、低功耗约束下,保障多器件间纳秒级的时间同步精度以及从强噪声中提取微弱超声信号的能力。

超声速度场重建算法正向物理模型与数据驱动深度融合的方向发展。开发能够自适应流场状态、兼具实时性与超高精度的混合智能重建算法,将是彻底解决该领域长期面临的病态性、欠定性等核心挑战的关键。

未来的系统将具备更强的环境感知与自适应能力。通过自适应信号处理与超声相控阵技术,系统能实时调整声束发射角度与信号参数,动态优化测量性能。未来也可以将超声测量数据与计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)仿真深度耦合,构建流场的数字孪生模型。解决上述问题,发展未来技术,超声测速在速度计量方面的应用将会更加广泛。

4 结论

超声测速技术作为一种非侵入、无压损的流速测量方法,在复杂畸变流场测量领域展现出显著优势。本文系统回顾了时差法、多普勒法等主流超声测速方法的原理与应用,重点分析了超声速度场重建中的病态逆问题及其反演算法。最小二乘法、Tikhonov正则化、截断奇异值分解等经典算法虽在重建中取得一定成效,但仍受限于模型简化、噪声敏感与参数依赖等问题。

为应对高声束漂移与低信噪比等物理挑战,研究提出了物理-信号联合处理策略,指出未来技术发展的三大方向:融合物理先验的深度学习、CFD-声学仿真耦合、系统芯片化集成。这些方向将推动超声测速技术向高精度、自适应与微型化

发展,为其在航空发动机、工业管道等复杂环境中的工程化应用提供重要支撑。

参考文献

- [1] BARTH M, RAABE A, HOLSTEIN P, et al. Acoustic travel time tomography as a tool to investigate temperature distributions on different spatial scales [C]// Proceedings of the 12th International Symposium on Acoustic Remote Sensing, 2004.
- [2] 赵晨曦. 激光多普勒测速系统信号处理研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2024.
ZHAO C X. Research on signal processing of laser Doppler velocimetry system [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2024. (in Chinese)
- [3] BILAL M, 田振玉. 粒子图像测速技术: 从实验室到工业应用的进展[J]. 光子学报, 2023, 52(3): 36-58.
BILAL M, TIAN Z Y. Recent development and applications of particle image velocimetry from laboratory to industry (Invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(3): 36-58. (in Chinese)
- [4] 胡振. 基于激光吸收光谱技术的高灵敏痕量气体传感系统的研究与应用[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2024.
HU Z. Research and application of high-sensitivity trace gas sensing system based on laser absorption spectroscopy technology [D]. Qufu: Qufu Normal University, 2024. (in Chinese)
- [5] FESSENDEN R A. Signaling by ultra-audible sound waves [P]. 1912.
- [6] 方翔, 修吉平. 超声波气体流量计的研制[J]. 自动化技术与应用, 2005(5): 67-69.
FANG X, XIU J P. A new ultrasonic gas-flowmeter [J]. Techniques of Automation and Applications, 2005(5): 67-69. (in Chinese)
- [7] 崔佳. 多声道超声波气体流量计的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
CUI J. Research on multi-channel ultrasonic gas flowmeter [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [8] GRAY J W. Apparatus for measuring air speed: US2534712 A [P]. 1950.
- [9] 张居奇. 基于超声折/反射效应的非均匀流场多参数场层析重建[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
ZHANG J Q. Multi-parameter field tomography reconstruction of inhomogeneous flow field based on ultrasonic refraction/reflection effect [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023. (in Chinese)

- [10] 孙小平, 田丰, 刘立云, 等. 基于声波传感器的炉内温度测量方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2005(2): 26-28.
SUN X P, TIAN F, LIU L Y, et al. Study of measurement method of temperature in furnace based on acoustic sensors[J]. Instrument Technique and Sensor, 2005(2): 26-28. (in Chinese)
- [11] 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 Z Q, JIANG G S, 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. (in Chinese)
- [12] 安连锁, 沈国清, 张波, 等. 电站锅炉中声学测温的试验研究[J]. 电站系统工程, 2007, 23(2): 23-25.
AN L S, SHEN G Q, ZHANG B, et al. Experiment study on acoustic pyrometry in power plant boiler [J]. Power System Engineering, 2007, 23(2): 23-25. (in Chinese)
- [13] 田丰, 孙小平, 邓福军, 等. 声学法电站锅炉温度场重建算法的研究与比较[J]. 量子电子学报, 2003, 20(5): 607-612.
TIAN F, SUN X P, DENG F J, et al. Research and comparison on reconstruction algorithm of temperature field in power plant boilers based on acoustic method[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2003, 20(5): 607-612. (in Chinese)
- [14] 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): 212-215.
TIAN F, SUN X P, SHAO F Q, et al. A study on complex temperature field reconstruction algorithm based on combination of Gaussian functions with regularization method [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 212-215. (in Chinese)
- [15] 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): 702-706.
SHEN G Q, WU Z Q, AN L S, et al. Reconstruction of temperature fields of furnace on the basis of few acoustic data [J]. Journal of Power Engineering, 2007, 27(5): 702-706. (in Chinese)
- [16] 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 QING, AN L S, JIANG G S, 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. (in Chinese)
- [17] 李芝兰, 颜华, 陈冠男. 基于修正Landweber迭代的声学温度场重建算法[J]. 沈阳工业大学学报, 2008, 30(1): 90-93.
LI Z L, YAN H, CHEN G N. Acoustic temperature field reconstruction algorithm based on modified Landweber iterative method [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2008, 30(1): 90-93. (in Chinese)
- [18] LU J, WAKAI K, TAKAHASHI S, et al. Acoustic computer tomographic pyrometry for two-dimensional measurement of gases taking into account the effect of refraction of sound wave paths [J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11(6): 692-697.
- [19] 田丰, 邵富群, 王福利. 基于正则方法与迭代技术相结合的复杂温度场重建算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2003, 24(4): 307-310.
TIAN F, SHAO F Q, WANG F L. A complex temperature field reconstruction algorithm based on combination of regularization method and iterative technology [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2003, 24(4): 307-310. (in Chinese)
- [20] 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(1): 159-167.
- [21] SALERNO E, TONAZZINI A. 2D Image reconstruction from sparse line - integral data [J]. Signal Processing, 1991, 23(2): 193-203.
- [22] 崔婷婷. 电站锅炉烟道温度场及流场声学测量技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
CUI T T. Research on acoustic measurement technology in temperature field and flow field of power plant boiler flue [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [23] 白燕. 深海热液速度场声学法测量及重建算法研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2011.
BAI Y. Study on the acoustic velocity measurement and its data reconstruction for the deep-sea hydrothermal [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2011. (in Chinese)
- [24] 袁存林, 宋义壮. 基于小波框架的稀疏正则化方法及其在图像复原中的应用[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2021, 36(2): 155-161.
YUAN C L, SONG Y Z. Wavelet frames based sparse regularization method and its application in image restoration

- tion[J]. Journal of Shandong Normal University (Natural Science), 2021, 36(2): 155-161. (in Chinese)
- [25] 刘云彤, 陈琳, 何宽, 等. 病态加权总体最小二乘模型的截断奇异值解法[J]. 测绘科学技术学报, 2020, 37(2): 111-116.
- LIU Y T, CHEN L, HE K, et al. Truncated singular value decomposition solution to ill - posed weighted total least squares adjustment[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2020, 37(2): 111-116. (in Chinese)
- [26] 杨智翔, 窦智, 王雅静, 等. 流动气溶胶总体最小二乘混合正则化动态光散射反演[J]. 中国激光, 2025, 52(6): 0604001.
- YANG Z X, DOU Z, WANG Y J, et al. Dynamic light scattering inversion of flow aerosols using mixed regularization based on total least squares [J]. Chinese Journal of Lasers, 2025, 52(6): 0604001. (in Chinese)
- [27] 肖友洪, 吕国学, 季振林. 依据场点声压进行振源表面振速重建的方法研究[J]. 应用力学学报, 2016, 33(2): 306-311.
- XIAO Y H, LV G X, JI Z L. Reconstruction of surface vibration velocity using filed point pressure method[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2016, 33(2): 306-311. (in Chinese)
- [28] LI J H, MIKADA H, TAKEKAWA J. Inexact augmented Lagrangian method-based full-waveform inversion with randomized singular value decomposition[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2024, 21(2): 572-597.
- [29] MYLVAGANAM K S. High - rangeability ultrasonic gas flowmeter for monitoring flare gas[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1989, 36(2): 144-149.
- [30] LIU Y X, ZHOU X Z, ZHU J L, et al. Sound waves tracing method in temperature - velocity coupling field of nuclear reactor [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 258: 124658.
- [31] 龚静宜. 大口径衬胶管道流量测量技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2021.
- GONG J Y. Research on flow measurement technology of large diameter rubber - lined pipes [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021. (in Chinese)
- [32] ZHANG J Q, QI H, JI Y K, et al. Nonlinear acoustic tomography for measuring the temperature and velocity fields by using the covariance matrix adaptation evolution strategy algorithm[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 4500214.
- [33] CHEN Y X, ZHOU X Z, ZHU J L, et al. Measured regional division optimization for acoustic tomography velocity field reconstruction in a circular area [J]. Sensors, 2024, 24(6): 22.
- [34] DUAN Y X, CHEN L W, ZHOU X Z, et al. Boiler furnace temperature field measurement and reconstruction error elimination based on temperature field residual correction network [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 2507215.
- [35] RAISSIM, PERDIKARIS P, KARNIADAKIS G E. Physics -informed neural networks: a deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations[J]. Journal of Computational Physics, 2019, 378: 686-707.
- [36] ZHU Y Z, KONG W Z, DENG J, et al. Physics-informed neural networks for unsteady incompressible flows with time - dependent moving boundaries [EB/ OL]. 2023: arXiv: 2308.13219. <https://arxiv.org/abs/2308.13219>.
- [37] KONG Q, WANG Z, CUI F, Et al. Acoustic tomography method for temperature and velocity fields simultaneous measurement[J]. Measurement, 2025, 250: 117198.
- [38] CHEN L W, DUAN Y X, TIAN Q Y, et al. Boiler furnace fast response temperature field reconstruction network based on acoustic measurement [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 2508914.

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一作者: 李鑫昊(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超声测速。



通信作者: 王毅(1977—), 男, 研究员, 主要研究方向为流场参数测量校准。