DOI: 10.19666/j.rlfd.202511071

垃圾焚烧炉 SNCR 系统温度场声感知时间延迟估计方法研究

李盛之[1]，张世平[1]，袁　俊[2]，沈国清[1]
（1. 华北电力大学能源动力与机械工程学院，北京　102206；
2. 深圳量云能源网络科技有限公司，广东　深圳　518000）

［摘　　要］【目的】为垃圾焚烧炉 SNCR 系统在 850~1 100 ℃温度窗口内实现精准声学控温，提供高可靠性的时延估计数据与方法支持。【方法】提出一种基于声学测温的 VMD-WT-GCC 时延估计方法，该方法通过变分模态分解（VMD）与小波阈值（WT）降噪的协同处理，以提升强噪声环境下的时延估计精度，并利用现场噪声数据进行模拟验证，同时在受控实验室环境及工业现场开展实验测试。【结果】基于现场噪声数据的模拟表明，在信噪比 5~–10 dB 的范围内，所提 VMD-WT 降噪法在模拟信噪比增益、结构相似性指数和相关系数等指标上均显著优于单一的小波阈值降噪法；实验室实验在(–3.2±0.5) ℃的受控环境下进行，在 1~5 m 的不同传播路径上，测温平均绝对误差均低于 0.20 ℃；现场工业试验进一步证实，于距离地面 30.1 m 高的垃圾焚烧炉 SNCR 系统所在断面上，单路径声学测温结果与基准数据的偏差平均稳定在 50 ℃以内。【结论】该研究所提方法在强噪声背景下展现出优越的时延估计精度与稳定性，为垃圾焚烧炉 SNCR 系统的高精度温度监测提供了有效技术途径，具有显著的工程应用前景。

［关　键　词］SNCR；时延估计；声学测温；变分模态分解（VMD）；小波阈值降噪

［引用本文格式］李盛之，张世平，袁俊，等. 垃圾焚烧炉 SNCR 系统温度场声感知时间延迟估计方法研究[J]. 热力发电，2026, 55(8): 117.　Li S Z, Zhang S P, Yuan J, et al. Research on a time-delay estimation method using acoustic sensing for temperature field monitoring in SNCR systems of waste incineration furnaces[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(8): 117.

Research on a time-delay estimation method using acoustic sensing for temperature field monitoring in SNCR systems of waste incineration furnaces

Li Shengzhi[1], Zhang Shiping[1], Yuan Jun[2], Shen Guoqing[1]
(1. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Shenzhen Quantum Cloud Energy Network Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: [Objective] Precise temperature monitoring within the optimal reaction window (850~1 100 ℃) is critical for the efficiency and low-emission operation of selective non-catalytic reduction (SNCR) systems in waste incineration furnaces. Conventional contact-based measurement methods often suffer from time lag, mechanical fragility, and limited adaptability to harsh, high-temperature environments. This study aims to develop a robust acoustic thermometry technique to provide highly reliable time-delay estimation, thereby enabling accurate and real-time temperature monitoring for SNCR system control. [Methods] To address the challenge of strong background noise in industrial settings, an enhanced time-delay estimation method named VMD-WT-GCC is proposed. The core innovation lies in the synergistic combination of variational mode decomposition (VMD) and wavelet threshold (WT) denoising as a pre-processing step for the generalized cross-correlation (GCC) algorithm.

收 稿 日 期：2025-11-21　修 回 日 期：2026-02-04　接 受 日 期：2026-02-10
基 金 项 目：国家自然科学基金项目（12274122）
Supported by：National Natural Science Foundation of China (12274122)
第一作者简介：李盛之（1999），男，硕士研究生，主要研究方向为声学测温技术，1773381510@qq.com。
通信作者简介：张世平（1983），男，博士，副教授，主要研究方向为智慧电厂温度可视化技术，zhangshipingf718@126.com。

The VMD adaptively decomposes the acquired acoustic signal into intrinsic mode functions, effectively separating the useful signal components from noise. Subsequently, the WT technique is applied for further refinement and thresholding of these components. This two-stage denoising strategy significantly enhances the signal quality before performing GCC for precise time-of-flight calculation, which is then converted to temperature via the known sound speed-temperature relationship. The method's performance was rigorously evaluated through simulation, laboratory experiment, and industrial field trials. [Results] Simulation analysis, utilizing actual on-site noise data, was conducted across a challenging signal-to-noise ratio (SNR) ranging from 5 dB to –10 dB. The proposed VMD-WT denoising method demonstrated superior performance compared to the conventional wavelet threshold method alone, showing marked improvements in key metrics: simulated SNR gain, the structural similarity index (SSIM), and the correlation coefficient (CC). Laboratory experiments were performed in a controlled acoustic environment with a stable temperature of (–3.2 ± 0.5) ℃. Results confirmed the method's high accuracy, with the average absolute error of temperature measurement remaining below 0.20 ℃ across various propagation paths ranging from 1 m to 5 m. A field trial was implemented on a 750 t/day waste incinerator, specifically at the SNCR ammonia injection plane located 30.1 m above the furnace grate. The single-path acoustic temperature measurements showed consistent stability, with the average deviation from benchmark reference data maintained within 50 ℃, validating the method's robustness under real industrial operating conditions. [Conclusion] The developed VMD-WT-GCC method exhibits exceptional accuracy and stability for time-delay estimation in strong noise backgrounds, overcoming a major limitation of acoustic thermometry in practical applications. It provides a viable and effective technical solution for high-precision, non-contact temperature monitoring in complex industrial environments like waste incineration furnaces. The successful validation from simulation to field deployment underscores its strong engineering applicability and promising potential for optimizing SNCR system performance, contributing to improved combustion control and emission reduction.

Key words: SNCR; time delay estimation; acoustic thermometry; variational mode decomposition; wavelet threshold denoising

“十四五”规划将生活垃圾分类和处理基础设施建设放在首位，在推进垃圾焚烧技术的同时，必须严格保护环境，最大限度地减少燃烧过程中的污染物排放。为减少垃圾焚烧过程中的氮氧化物（NO_x）排放，选择性非催化还原（selective non-catalytic reduction，SNCR）技术因其成本较低且脱硝效率较高被广泛应用于烟气净化系统中。与其他脱硝方法相比，SNCR 技术的稳定、安全和高效运行需要将脱硝反应温度精确控制在最佳范围（850~1 100 ℃）内[1]。然而，目前垃圾焚烧炉中的 SNCR 氨喷射设计严重依赖于操作人员的经验。炉膛烟气温度场分布不均可能导致还原剂注入过程偏离最佳温度范围，从而引起脱硝效率降低和氨泄漏。因此，实时、准确地监测 SNCR 系统中的炉膛烟气温度对于优化脱硝性能至关重要[2]。

声学测温法具备快速响应、连续测量和使用寿命长等优势，并能突破传统接触式测温方法只能进行单点测量的局限，实现对整个区域的二维温度场测量，在锅炉测温领域具有广阔的应用前景。2007 年沈国清等[3]基于国内某 300 MW 发电机组的炉膛噪声，开展了基于自适应滤波、高阶累积量以及相位谱估计的时延估计仿真研究，结果表明在较高信噪比条件下，上述方法均可实现准确的时延估计，为声学测温的实际工程应用提供了理论依据。2018 年，张世平、沈国清等[4]在 300 MW 机组声学测温平台上，将基于二次相关的 PHAT-β 时延估计算法应用于实际测温，在强混响环境中仍能准确获取温度数据。Yang 等人[5]结合高阶累积量与自适应滤波，提出一种基于高阶累积量的自适应声波时延估计算法，并在额定蒸发量为 220 t/h 的燃煤锅炉稳定工况下开展实验，验证了该算法在灵活性和计算速度方面的优势。2023 年，唐林锋[6]在额定蒸发量 69.3 t/h 的燃煤锅炉中，采用基于希尔伯特变换优化的广义互相关时延估计算法进行实验，结果表明即便在低信噪比和强混响的热态环境中，该算法重建的温度场质量更高，更符合炉膛实际温度分布。

当前时延估计技术主要应用于运行稳定的燃煤锅炉，而在燃料种类多变、燃烧工况复杂、运行环境恶劣的垃圾焚烧炉中研究较少[7]。因此，开发自适应性更强、抗噪与抗混响性能更优的时延估计算法成为研究重点[8]。Johnstone 等人[9]提出的小波阈值降噪技术虽适用于多种噪声类型，但其性能依赖于人工阈值选择与分解层数设定，自适应能力有限。Dragomiretskiy 等人[10]提出的变分模态分解（variational mode decomposition，VMD）可自适应地将信号分解为固有模态函数（intrinsic mode function，IMF），但 VMD 本质上属于一种强制降噪

方法，其基于预设阈值对 IMF 分量进行筛选的过程中，可能将与噪声能级相近的低幅值有用信号成分一并剔除，从而导致有效信息的丢失。将 VMD 与小波阈值降噪算法融合的方法可充分发挥两者的协同优势：一方面，VMD 提升了小波阈值降噪算法的自适应性，使其能够更灵活地处理不同特性的信号；另一方面，小波阈值降噪通过对 VMD 分解后的各 IMF 分量进行精细化处理，有效保留更多包含有用信息的 IMF 分量，避免过度降噪。针对垃圾焚烧炉烟道结构紧凑、空间受限所导致的显著混响干扰，可采用广义互相关（generalized cross-correlation，GCC）中的相位变换（phase transform，PHAT）加权方法[11]，有效抑制多径效应与混响带来的时延估计偏差。

综上，本文提出了一种融合变分模态分解（VMD）与小波阈值降噪的广义互相关（variational mode decomposition-wavelet threshold-generalized cross-correlation，VMD-WT-GCC）时延估计算法，并设计了从“理论仿真”到“工业实证”的递进验证方案：首先，基于现场采集的真实噪声数据进行数值模拟，以验证算法在强噪声背景下的鲁棒性；然后，在实验室受控环境中开展冷态实验，旨在剥离复杂工况干扰，为方法建立精确的测量基准并验证其抗混响能力；最后，在垃圾焚烧炉 SNCR 系统中进行现场工业试验，综合评估其在真实工业环境下的性能。

1 原　理

1.1 声学温度测量原理

声波在气体中的传播速度由声波方程和理想气体状态方程推导得出，与介质的温度直接相关[12]：

$$c=\sqrt{\frac{\gamma R}{M}T} \tag{1}$$

式中：c 为声波在气体介质中的传播速度，m/s；γ为气体的绝热指数；R 为理想气体常数，J/(mol·K)；M 为气体的摩尔质量，kg/mol；T 为气体的温度，K。在实际工程应用中，气体组分的成分变化很小，通常 $\sqrt{\gamma R/M}$ 可视为常数 Z，则气体成分保持不变，式(1)简化为：

$$c=Z\sqrt{T} \tag{2}$$

式(2)在声波传播速度 c 和气体温度 T 之间建立了单值函数关系。在实际应用中，声波发射器和接收器之间的固定距离 L，可通过精确测量声波传播时间确定气体温度。

$$c=\frac{L}{t}=Z\sqrt{T} \tag{3}$$

为精确重建炉膛断面二维温度场，必须有效应对断面温度不均匀性的挑战。本研究在相对炉壁上布置了多传感器阵列，其设计基于以下假设：在宏观测量尺度下，壁面边界层与低速流场（Ma<<1）对声波传播的扰动可忽略。通过测量网络中各路径的声波传播时间并应用式(3)进行计算，可获得覆盖整个断面的路径平均温度数据，从而重建出二维温度分布。

1.2 时延估计原理

图 1 为单路径声学测温系统建立了一个声学时延估算数学模型。

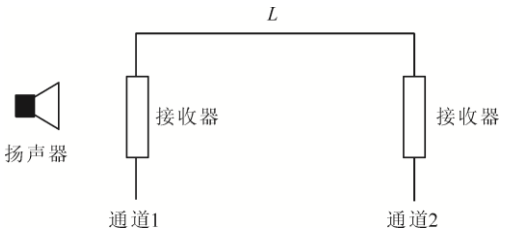


图 1 双通道测量示意

Fig.1 Schematic diagram of dual-channel measurement

通道 1 和通道 2 接收到的声信号表示为：

$$x_1(n)=s(n)+w_1(n) \tag{4}$$

$$x_2(n)=s(D-n)+w_2(n) \tag{5}$$

式中：$s(n)$为声换能器发出的源信号；D 为真实时延；$w_1(n)$和 $w_2(n)$分别为通道 1 和通道 2 的背景噪声。

时延估计的核心任务是利用合适的算法有效抑制强噪声环境下的干扰，从有限的采集数据中精准获取真实时延值 D。

1.3 变分模态分解原理

变分模态分解（VMD）是一种自适应、完全非递归的信号处理方法，能有效将信号分解为若干具有不同中心频率的固有模态函数（IMF）。其核心思想是通过变分优化，迭代寻求各模态的最佳中心频率与带宽，从而有效分离频域中噪声主导的固有模态。

VMD 约束变分模型的公式为：

$$\min_{\{\mu_k,\omega_k\}}\left\{\sum_{k=1}^{K}\left\|\frac{\partial\mu_k}{\partial t}+\omega_k\mu_k\right\|^2+\alpha\cdot\left\|\mu_k\right\|^2\right\} \tag{6}$$

在优化过程中，通常会添加一些约束条件，具体如式(7)所示：

$$\sum_{k=1}^{K} u_k(t) = f \tag{7}$$

式中：u_k={$u_1, u_2, \ldots, u_k$}为每个模式的函数；ω_k={ω_1, ω_2, …, ω_k}为每个模式的中心频率。

为了解决这个受约束的优化问题，本文用拉格朗日乘数法结合二次惩罚项，提出了增强拉格朗日函数（式(8)），从而将受约束的变分问题转化为无约束的等价问题。

$$L(\{u_k\},\{\omega_k\},\lambda) = \alpha\sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] \mathrm{e}^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle \tag{8}$$

式中：α为惩罚系数；λ为拉格朗日乘数。

1.4 小波阈值降噪原理

小波阈值降噪利用小波变换进行多分辨率分析，将信号分解成不同的频率子带。对于给定信号$x(t)$，小波变换（WT）的数学定义为：

$$W_x(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\psi_{a,b}(t)\mathrm{d}t \tag{9}$$

式中：$W_x(a, b)$为小波系数；$\psi_{a,b}(t)$为小波基函数。

WT 将信号分解为多分辨率分量：小波分解将信号划分为低频近似系数和包含主要噪声的高频细节系数。通过阈值处理可抑制噪声主导的细节系数。经过阈值处理后，重建信号 $\hat{x}(t)$为：

$$\hat{x}(t) = \sum_{j=0}^{J} c_j \varphi(t) + \sum_{j=0}^{J} h_j \psi_j(t) \tag{10}$$

式中：J 为最大分解层数；c_j 为层次 j 的近似系数，表示信号低频部分的特征；h_j 为层次 j 的细节系数，表示信号的高频成分；$\varphi(t)$为与小波基对应的尺度函数；$\psi_j(t)$为层次 j 的小波函数。

1.5 VMD-WT-GCC 算法时延估计模型

VMD-WT-GCC 算法的逻辑可概括为 5 个核心步骤，具体如图 2 所示。首先，对原始信号进行变分模态分解，将其自适应地分解为多个模态函数；进而，通过计算各 IMF 与原始信号的相关系数，筛选出信号主导分量后重构得到降噪信号；然后，对重构信号进行小波阈值处理，进一步抑制残留噪声；最后，通过广义互相关（GCC）相位变换（PHAT）加权对信号的互功率谱进行归一化处理，有效抑制多径效应与混响干扰。

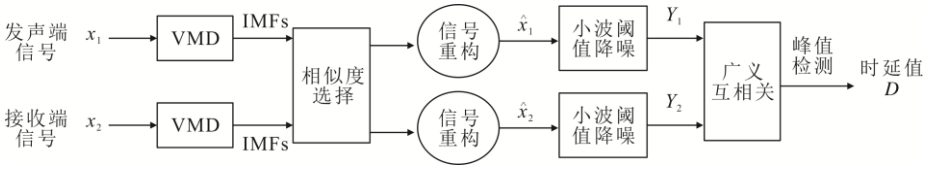


图 2 VMD-WT-GCC 时延估算模型

Fig.2 VMD-WT-GCC time-delay estimation model

VMD-WT-GCC 时延估计算法的性能受到多个关键参数的影响，其核心调控参数主要包含以下 4 类。

1）VMD 中的惩罚因子α　该参数直接影响模态分量的带宽约束与中心频率的提取精度，取值过大会导致模态失真，过小则易引起噪声残留。本研究在综合文献分析的基础上[13-14]，结合多次模拟实验进行系统验证，最终确定将α设置为 2 000。此参数取值在保证模态分量完整性的同时，有效抑制了噪声干扰，为后续信号处理环节提供了可靠基础。

2）VMD 的分解层数 K　分解层数 K 的取值过小易模态混叠，过大则计算冗余。本文通过对比 3、4、5 3 种层数的模拟结果，确定层数 4 为最优选择，层数 4 能最佳地权衡信号保真度、降噪效果与计算效率。

3）相似度阈值　相似度阈值用于从 VMD 分解后的 IMF 中筛选有效分量，其取值关系到信号保留与噪声抑制的平衡。阈值过高会损失有用频率信息，过低则引入过多噪声。本文基于多个现场测点的实际声波信号，系统分析了 IMF 与原始信号的相似度分布，最终将阈值确定为 0.6。此设定在保留有效模态的同时显著抑制噪声。

4）小波基函数的选择　db04 小波具有 4 阶消失矩和紧支撑性。能有效捕捉声波信号中的瞬态细节，同时平滑抑制高频噪声，在信号保真与降噪强度之间取得理想平衡，并且计算复杂度低，适用于声学测温中高频采样数据的实时处理需求，能有效支撑现场设备的连续运行。

2 基于现场噪声的模拟研究

本研究的现场试验基于一座日焚烧量为 750 t 的垃圾焚烧炉，测点布置平面如图 3 所示。声学测

温断面设于距地面 30.1 m 处，此位置即为该炉 SNCR 系统的反应区。该 SNCR 系统的尿素喷射层（标高 25 m）装有 8 支雾化喷枪（前墙 4 支，左右侧墙各 2 支）。此反应区位于炉膛燃烧器上方、锅炉对流受热面之前，为 SNCR 的典型工艺位置。

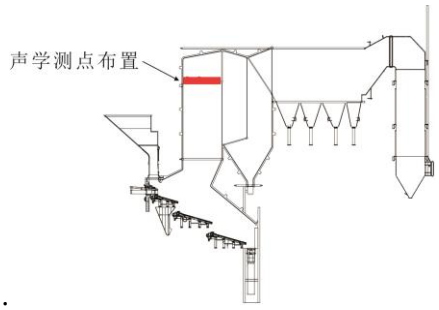


图 3 测点布置平面
Fig.3 Layout of measurement points

背景噪声特征采集自我国某日均处理 750 t 城市固体废物的垃圾焚烧设施的 SNCR 系统。8 个声学收发器测量点（编号 1—8）的现场布线和空间分布如图 4 所示。

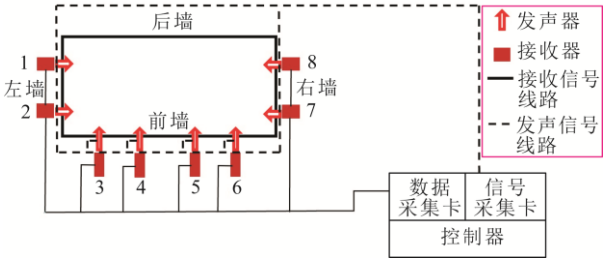


图 4 线路结构和测量点布局
Fig.4 Network topology and measurement points deployment

2.1 噪声的采集与分析

在背景噪声采集阶段，发生器保持关闭以获取纯净的环境噪声数据，八通道接收器同步运行采集多测点噪声信号。数据采集系统以 100 kHz 采样率工作，采样点为 65 536，为保障统计可靠性，各接收器进行 20 次重复测量。图 5 呈现了部分通道噪声的瞬态频谱分布。

SNCR 反应区位于主燃烧区上方，燃烧过程在此已基本完成，环境由高温烟气主导，无固体燃料燃烧或明火。然而功率谱分析表明，强烈的背景噪声依然存在，其主要由残余燃烧湍流（低频，频率小于 500 Hz）和尿素喷射噪声（高频，频率大于 10 000 Hz）构成，并与多径效应一起，成为声学测温在此环境下面临的主要挑战。

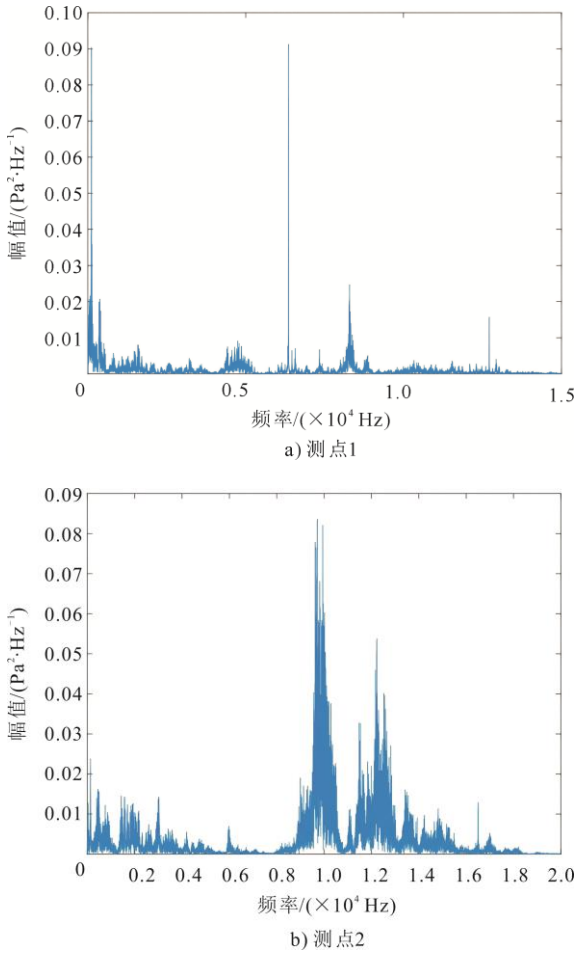


图 5 现场背景噪声的频域图
Fig.5 Spectra of the acquired background noise

2.2 模拟研究

本文采用现场噪声与软件模拟生成信号相结合的模拟方法。利用 MATLAB 软件将基准声学信号构建为线性扫频信号（linear frequency sweep，LFS），参数设置为：起始频率 500 Hz、截止频率 2 500 Hz（避开低频与高频背景噪声）、采样点数 65 536。将该信号与现场采集的噪声数据叠加，合成带噪的模拟信号。

在发射端模拟中，依据现场调试所获得的实验数据，将各测点发声端的信噪比基准设定为 25 dB。

在接收端模拟中，由于不同声音传播路径下，声音的衰减情况也存在差异，通过固定噪声幅度、调整 LFS 信号幅度，在不同接收器位置设置了–10、–5、0、5 dB 4 个信噪比条件，系统评估不同信噪比环境下算法的性能。

图 6 以测量点 8 为例展示了在信噪比为–5 dB 条件下合成的线性扫频信号，用于验证 VMD-小波降噪算法的噪声抑制效果。

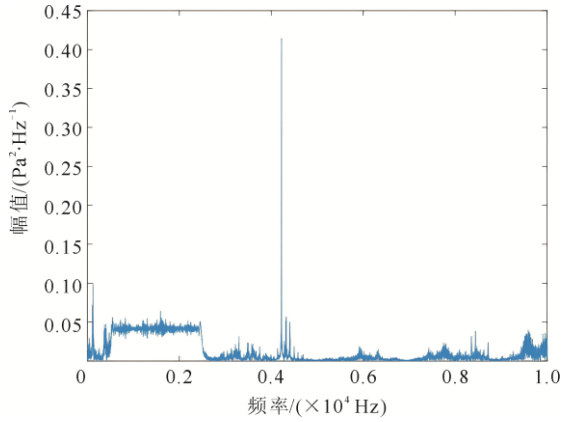


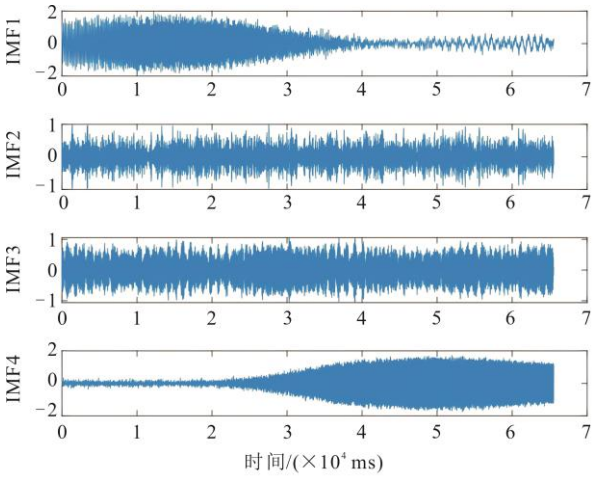
图 6 测量点 8 的模拟信号
Fig.6 Simulated signal at measurement point 8

为有效分离噪声并保留有用信息，本文依据表 1 的量化分析，选取相关系数ρ高于 0.6 的阈值的 IMF 进行信号重构，以保留主要信号特征进行信号重构。重构信号随后经小波阈值处理完成最终降噪，上述流程共同构成了 VMD-小波阈值降噪框架。

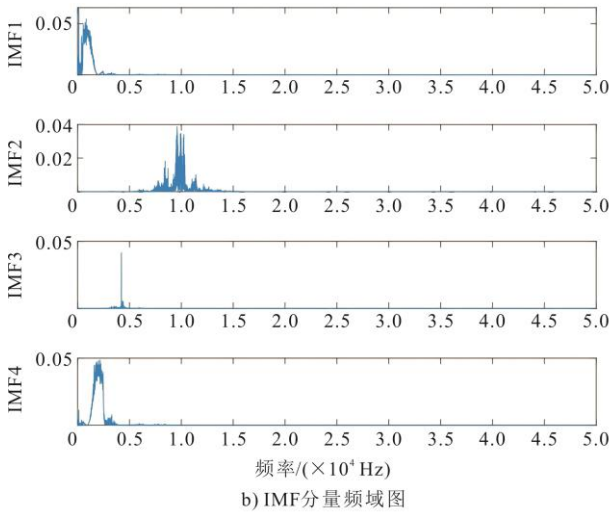
表 1 IMF 分量与模拟信号的相似值
Tab.1 Similarity values between the IMF components and the simulated signal

测点	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4
测点 3	0.612 0	0.119 1	0.596 6	0.692 4
测点 4	0.873 4	0.324 3	0.315 7	0.282 8
测点 5	0.634 6	0.586 5	0.694 0	0.230 9
测点 6	0.727 8	0.767 6	0.288 8	0.022 1
测点 7	0.682 0	0.258 0	0.368 1	0.694 4
测点 8	0.600 7	0.169 9	0.698 5	0.531 5

图 7 展示了通过变分模态分解（K=4，α=2 000）得到的 4 个固有模态函数的时域波形及其对应的频谱。



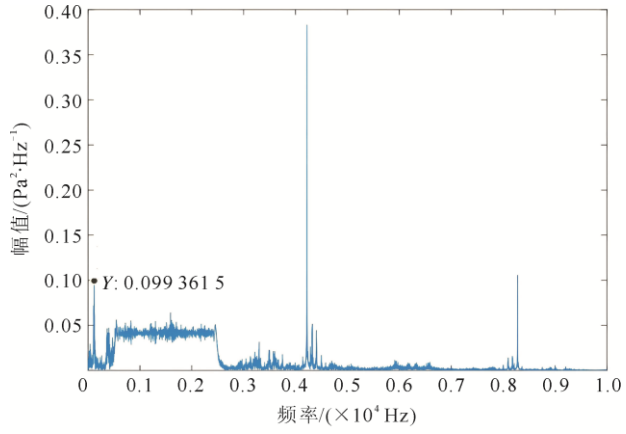
a) IMF分量时域图



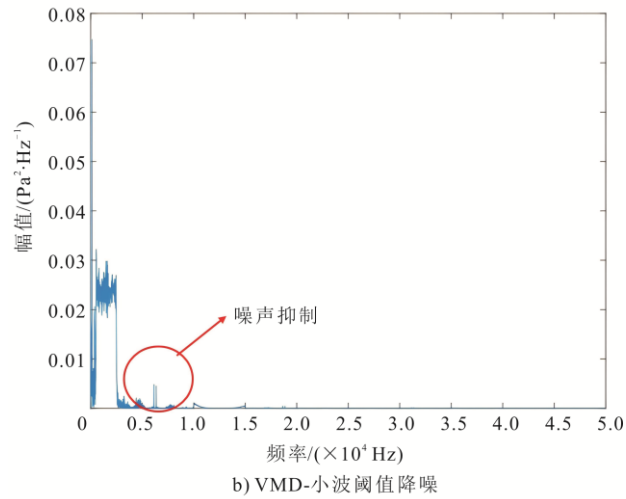
b) IMF分量频域图

图 7 IMF 分量时域与频域
Fig.7 Time-domain and frequency-domain plots of IMFs

图 8 比较了用 VMD-小波阈值方法和小波阈值法分别处理降噪信号的频谱特征。



a) 小波阈值降噪



b) VMD-小波阈值降噪

图 8 频域对比
Fig.8 Frequency domain comparison

如图 8 所示，2 种方法均表现出噪声抑制能力，但具有明显的频域特性差异：小波阈值降噪仅在部分高频段（如 10 kHz）具有显著抑制效果，而在其他频段性能下降明显；VMD-小波阈值降噪则表现出更全面的频带覆盖能力，不仅对 2 500 Hz 以上高频成分实现近完全抑制，同时对 500 Hz 以下低频噪声也保持良好抑制效果。

为系统评估不同噪声环境下算法的降噪性能，本研究在测量点 8 处对模拟信号进行了多信噪比（5、0、–5、–10 dB）条件下的测试。通过引入信噪比（signal-to-noise ratio，SNR）、结构相似性指数（structural similarity index，SSIM）与相关系数（correlation coefficient，CC）多项指标，对 VMD-小波阈值降噪与传统小波阈值降噪模型的性能进行了综合对比分析。详细数据对比如图 9 所示。

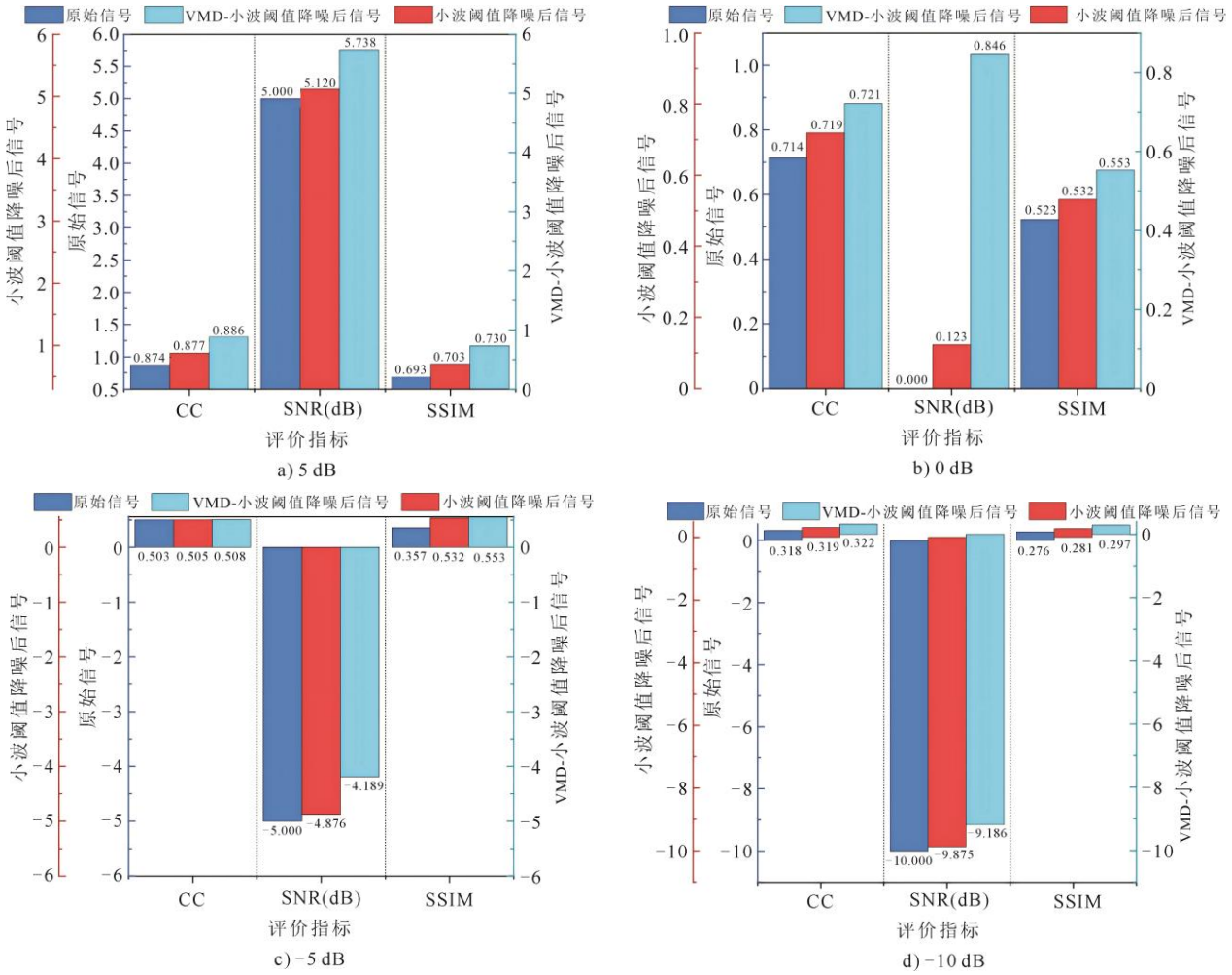


图 9 评价指标对比

Fig.9 Comparative graphs of evaluation indicators

信噪比为：

$$S_{\mathrm{SNR}}=10\lg\left(\frac{\sum_{i=1}^{N}s(i)^2}{\sum_{i=1}^{N}[\tilde{s}(i)-s(i)]^2}\right) \tag{11}$$

相关系数为：

$$C_{\mathrm{CC}}=\frac{\sum_{i=1}^{N}s(i)\tilde{s}(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}[s(i)]^2\sum_{i=1}^{N}[\tilde{s}(i)]^2}} \tag{12}$$

结构相似性指数为：

$$S_{\mathrm{SSIM}}=\frac{(2\mu_{\tilde{s}}\mu_s+C_1)(2\sigma_{\tilde{s}s}+C_2)}{(\mu_{\tilde{s}}^2+\mu_s^2+C_1)(\delta_{\tilde{s}}^2+\sigma_s^2+C_2)} \tag{13}$$

式中：N 为信号采样点数；i 为信号中数据点的序列号；$s(i)$为无噪声的线性扫描信号；$\tilde{s}(i)$ 为降噪后的信号；$\mu_{\tilde{s}}$ 和μ_s 分别为 $\tilde{s}(i)$ 和 $s(i)$的均值；$\sigma_{\tilde{s}}^2$ 和 σ_s^2 分别为 $\tilde{s}(i)$ 和 $s(i)$的方差；$\sigma_{\tilde{s}s}$ 为 $\tilde{s}(i)$ 和 $s(i)$的协方差；C_1 和 C_2 为避免分母为零而引入的常数。

VMD-小波阈值降噪法在信噪比–10~5 dB 时

性能显著优于传统小波阈值降噪法，且信噪比越低优势越明显。例如，在 S_{SNR}=5 dB 时，该方法带来 0.738 dB 的信噪比增益（残余噪声降低 41.2%），而小波阈值法增益仅为 0.120 dB（噪声抑制 9.1%）；当 S_{SNR}=–10 dB 时，VMD-小波阈值降噪法的信噪比增益为小波法的 6.5 倍，说明其在低信噪比下具有更强的噪声抑制能力。

在量化信号结构保真度的结构相似性指数方面，在信噪比–10~5 dB 的条件下，VMD-小波阈值降噪法在减小结构失真方面的效果是小波阈值降噪法的 1.1~4.2 倍，呈现出随信噪比降低而增强的趋势，表明其在极端噪声下仍能更好地保持波形完整性。

相关系数是量化降噪信号与原始纯净信号之间波形相似性和线性相关性的关键指标。在模拟条件下，VMD-小波阈值降噪法在保留原始信号波形信息的能力上为小波阈值降噪法的 1.4~4.0 倍左右，并且其值更接近 1，表明降噪过程对信号波形的扭曲越小，相位一致性保持得越好，为后续的时延估计提供了更可靠的输入。

VMD-小波阈值降噪法在信噪比增益、结构保真度和波形相关性 3 个关键指标上均展现出显著优势。该方法不仅能够有效抑制噪声干扰，还能更好地保持信号的结构完整性和波形特征。特别是在低信噪比环境下，其性能优势更为突出，证明了该方法在复杂声学环境中的强大适应性和鲁棒性。这些特性使其成为提升声学测温系统精度的有效解决方案，为工业应用中的高精度时延估计提供了可靠的技术支持。

3 实验与工程验证

上节从理论上验证了 VMD-小波阈值降噪法在复杂噪声环境下具有优秀的降噪能力。本节将进一步验证 VMD-WT-GCC 时延估计算法的实际性能与工程适用性。

3.1 实验室冷态实验研究

在实验室中搭建了如图 10 所示的单路径声学测温平台。该平台主要由扬声器、2 个 MP4021 阵列传感器、NI-4431 数据采集卡（data acquisition card，DAQ）以及用于温度标定的 K 型热电偶组成。

实验中，声源信号为 500~2 500 Hz 的线性扫频信号，传感器间距为 1 、3、5 m，热电偶测得的环境温度（–3.2 ℃）作为基准温度。采集到的信号经 VMD-WT-GCC 时延估计算法处理，反演温度并与参考值对比。图 11 展示了由式(3)计算所得的声波测温的测量结果。

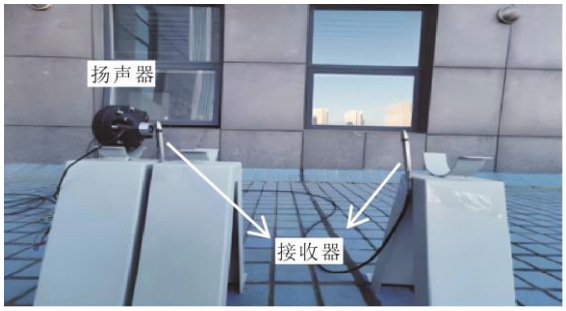


图 10 冷态实验平台
Fig.10 Experimental platform for cold-state tests

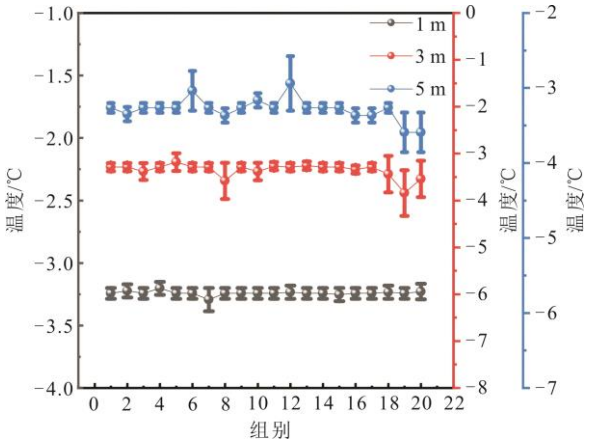


图 11 不同路径的声学测温值
Fig.11 Temperature values from acoustic thermometry for different paths

由图 11 可知，在不同路径长度下的实验结果表明，本文提出的 VMD-WT-GCC 时延估计算法具有良好的测温稳定性，测得的温度值都在极小误差范围内波动。与热电偶基准相比，在测量路径为 1 m 时，20 次连续试验中的平均绝对误差仅为 0.043 ℃，标准偏差为 0.022 ℃；在测量路径为 3 m 时，平均绝对误差 0.198 ℃，标准偏差 0.229 ℃；路径 5 m 时，平均绝对误差 0.117 ℃，标准偏差 0.136 ℃，该方法仍能保持稳定的测量性能。所有路径下的声学测温绝对误差均低于 0.20 ℃，标准差小于 0.23 ℃。上述测量误差能控制在工程可接受范围内，展现了其在实际应用中良好的适应性。

实验室的有限空间会引发显著的混响效应[15]，导致在时延估计的互相关函数中出现明显的伪峰。图 12 展示了在 3 m 时的互相关函数。

针对这一问题，本文提出的 VMD-WT-GCC 时延估计算法展现出良好的伪峰抑制能力。通过变分

模态分解有效分离混响产生的多径信号成分，并结合小波阈值处理对噪声进行抑制，该算法能够显著提升主峰的信噪比，从而在强混响环境下仍能实现时延的精准估计。算法处理后的互相关函数如图 13 所示。

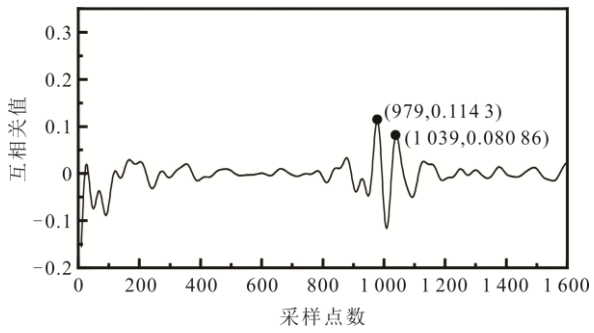


图 12 未降噪的互相关函数
Fig.12 Cross-correlation function plot without noise reduction

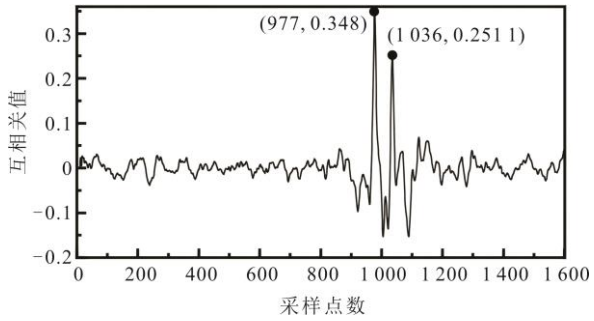


图 13 VMD-小波阈值降噪的广义互相关函数
Fig.13 VMD-wavelet denoised generalized cross-correlation

经 VMD-WT-GCC 时延估计算法处理后，在声音传播路径为 3 m 的条件下，互相关函数的主峰幅值从 0.114 增加到 0.348，增益达 3 倍左右，极大地增强了主峰的显著性。更为关键的是，算法有效抑制了伪峰干扰，将主峰与伪峰之间容易引发误判的幅值差从 0.033 44 扩大至 0.096 90，相对增幅达 190%，这意味着在时延估计中，系统将主峰误判为伪峰的概率被极大降低，从而显著提升了时延估计的可靠性和鲁棒性。

3.2 垃圾焚烧炉 SNCR 系统工程验证

本研究设计了一套分布式测点方案，用于构建覆盖整个炉膛截面的温度场声学测量系统，具体如图 14 所示。系统共布置 8 个声学收发一体式测点（编号 1–8），形成 20 条交叉测温路径，可实现 SNCR 系统烟气温度场的全面监测。

为实现声学测温系统在垃圾焚烧炉高温、高粉尘环境下的长期稳定运行，现场实验创新性地采用了声波导管与压缩空气定期吹扫系统，具体如图 15 所示。各测点以耐高温声波导管为主体结构，其内部集成了声波发生器、高灵敏度传声器及控制电磁阀等关键部件。声波导管一方面因其管状结构对声波传播具有波导效应，有助于增强声波信号的指向性，减少能量扩散，从而在物理层面初步提升信号的信噪比；另一方面可以实现传感器与恶劣烟气的物理隔绝，避免高温烧蚀与粉尘堆积，同时通过程序化控制的压缩空气脉冲吹扫，可定期清除附着于导管内壁的粉尘，有效抑制因积灰导致的信号衰减与路径堵塞。

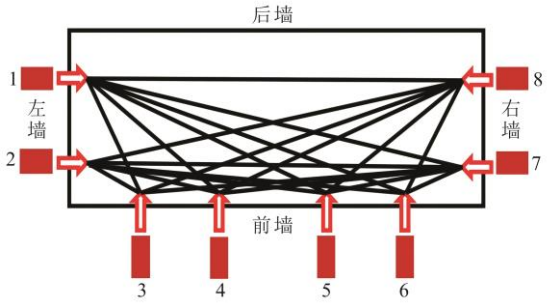


图 14 声学温度测量装置安装示意
Fig.14 Schematic diagram of acoustic temperature measurement device installation

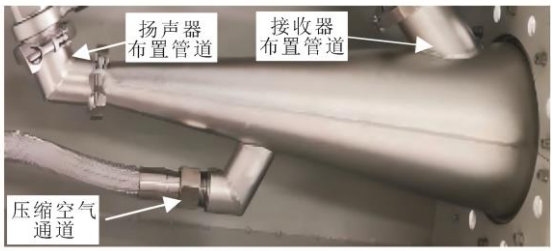


图 15 声波导管外观
Fig.15 Appearance drawing of the acoustic waveguide

在实验开始前，为保障声学测温的准确性，对全部 20 条声学路径的传播距离进行了精确测定，并同步完成烟气成分分析。结合 SNCR 系统要求的温度监测范围（850~1 100 ℃），基于式(3)推算出各路径的理论时延合理范围，结果汇总于表 2，为后续时延估计提供基准。

在算法验证阶段，选取以测点 1 为声源、测点 3、4、5、6、7、8 为接收端所构成的 6 条典型路径作为分析样本。该路径组合覆盖不同传播距离与空间方位，能够有效反映算法在炉膛实际工况下的适应性与鲁棒性。

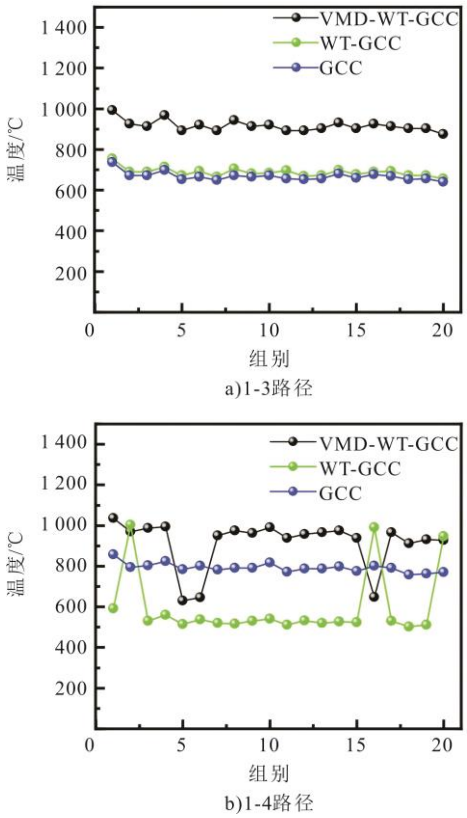
表 2 路径距离和时间延迟值的合理范围

Tab.2 Reasonable ranges for path distance and time delay values

路径	距离/m	时延值范围/ms	路径	距离/m	时延值范围/ms
1-3	2.873	386~427	2-7	9.506	1 278~1 413
1-4	4.384	589~651	2-8	9.601	1 291~1 427
1-5	6.632	891~986	8-3	8.459	1 137~1 257
1-6	8.347	1 122~1 241	8-4	6.411	862-953
1-7	9.594	1 290~1 426	8-5	4.192	563-623
1-8	9.506	1 278~1 413	8-6	2.942	395-437
2-3	1.840	247~273	7-3	8.168	1 098~1 214
2-4	3.789	509~563	7-4	6.021	809~895
2-5	6.255	841~930	7-5	2.842	382~422
2-6	8.050	1 082~1 196	7-6	1.952	262~290

在实验设置方面，控制声波发生器依次发射线性扫频信号，每组数据记录 20 次。为系统评估算法性能，将本文所提方法与小波阈值降噪-GCC（WT-GCC）算法以及未经验噪的直接 GCC 算法进行对比，从而综合验证其在工业噪声环境下的抗干扰能力与工程应用价值。图 16 对比了上述 3 种算法处理后的温度测量结果。

基于图 5 所示的背景噪声频域图、图 14 所示的炉膛声学测量网络布局及图 16 所示的多路径实验结果表明，测量点的空间位置、声波传播路径、噪声的影响以及信号处理方法四者共同耦合，影响着温度反演的准确性[16]。



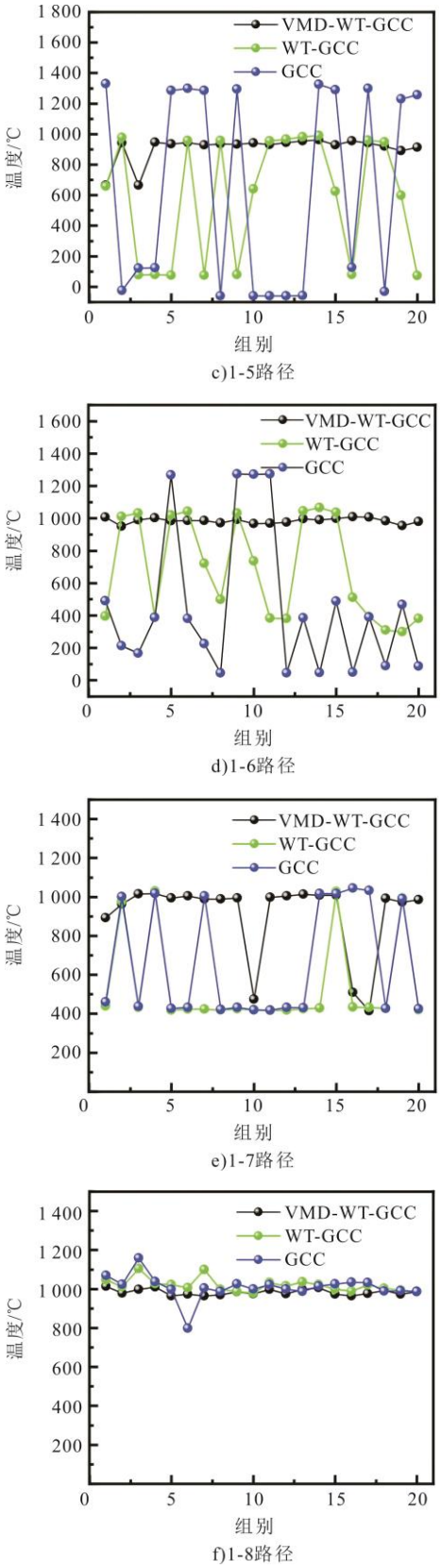


图 16 3 种算法处理后的温度对比

Fig.16 Comparison of the algorithm-derived temperatures

在近声源的 1-3 路径下，因声源在传播过程中衰减小，为算法稳定运行创造了条件。然而，测

点 3 附近存在强烈的低频燃烧噪声严重干扰了声源信号。VMD-WT-GCC 时延估计算法凭借其模态分解能力，能够从含噪信号中精准提取有效成分，从而实现精确的时延估计，计算得到准确的温度值；而 GCC 算法与 WT-GCC 算法无法有效进行信号的降噪，因噪声干扰得到不准确的时延值，导致结果出现明显偏差。

随着传播距离的增加，在中长路径（1-4 路径、1-5 路径、1-6 路径）下，声波衰减加剧，多径效应更加显著，算法的稳定性下降。为定量评估声学测温的现场精度，本实验将基准热电偶布设于声学测点旁，并以声学路径两端热电偶的平均值作为基准温度，进而建立与声学测量结果具有可比性的温度参考基准。3 种算法处理后的温差与准确率对比如图 17 所示。

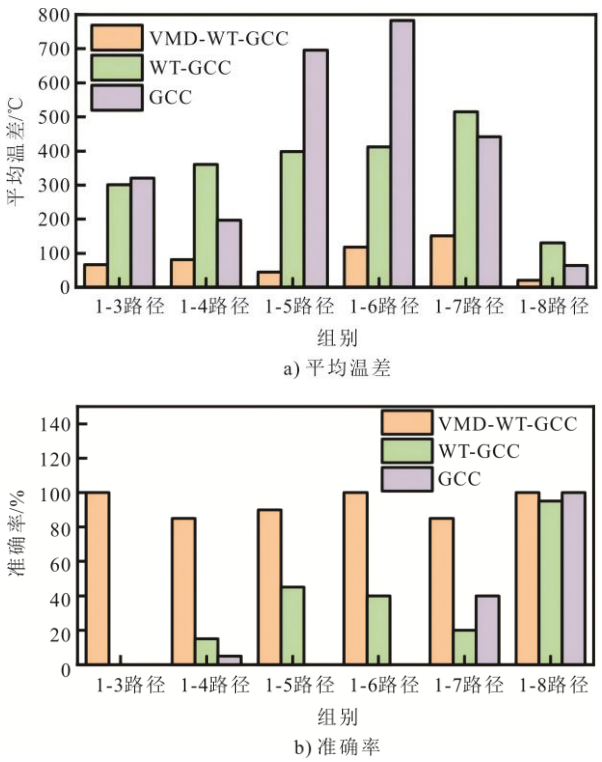


图 17 3 种算法处理后的温差与准确率对比
Fig.17 Comparison of temperature difference and accuracy processed by three algorithms

由图 17 可知：在 1-4 路径下 WT-GCC 算法仅有 15%的准确率；GCC 算法在 1-5 路径出现 693 ℃的平均温度偏差；VMD-WT-GCC 算法通过本征模态分解有效分离直达波与反射波，在最低准确率的 1-6 路径下仍保持 85%以上准确率。侧路径（1-7 路径、1-8 路径）的声音传播距离最长，但增设声波导管有效抑制了反射波干扰并增强了声音的指向性，增强了算法的稳定性，尤其在 1-7 路径下 3 种算法的准确性都在 95%以上，测温准确性得到明显提升，说明物理波导结构与信号处理算法的协同优化效果显著。

针对 SNCR 系统内噪声多样、多径效应等造成的时延估计不准确难题，本文提出的算法可有效提升声学测温多路径测量的稳定性，为实现炉膛截面温度场的全面监测奠定了基础。该算法结合声波导管与压缩空气吹扫系统构成的硬件保障，为构建覆盖炉膛截面的实时温度场、最终实现 SNCR 系统精准控温提供了可靠的技术支撑。

4 结　论

针对垃圾焚烧炉 SNCR 系统温度监测的切实需求，本文提出并系统验证了一种基于变分模态分解与小波阈值降噪的 VMD-WT-GCC 时延估计算法。通过数值模拟、实验室实验和现场验证 3 个方面的深入研究，得出以下结论。

1）VMD-WT-GCC 时延估计算法通过结合变分模态分解的自适应模态分离、小波阈值的精细化降噪与广义互相关的时延估计，形成了优势互补的处理链路。数值模拟数据表明，该方法在信噪比增益、结构相似性指数和相关系数等关键性能指标上均显著优于传统方法。

2）在实验室冷态实验中，该方法在不同传播距离（1~5 m）下均保持平均绝对误差小于 0.20 ℃，标准差小于 0.23 ℃。

3）现场工业验证表明，在日焚烧量为 750 t 的垃圾焚烧炉 SNCR 系统中，测温结果与基准数据的平均偏差稳定在 50 ℃以内，准确率超过 85%。

［参 考 文 献］

［1］ Hu Z, Jiang E, Ma X. Numerical simulation on operating parameters of SNCR process in a municipal solid waste incinerator[J]. Fuel, 2019, 245: 160.

［2］ 李茂东, 杨波, 倪进飞, 等. SNCR 在城市垃圾焚烧发电锅炉中的应用研究进展[J]. 节能技术, 2016, 34(1): 63.
Li M D, Yang B, Ni J F, et al. Research progress in SNCR technology of municipal solid waste incinerator[J]. Energy Conservation Technology, 2016, 34(1): 63.

［3］ 沈国清, 安连锁, 姜根山, 等. 电站锅炉声学测温中时间延迟估计的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(11): 57.
Shen G Q, An L S, Jiang G S, et al. Simulation of time delay estimation in acoustic pyrometry in power plant boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(11): 57.

［4］ 沈国清, 杨杰栋, 陈栋, 等. 基于二次相关 PHAT-β算法的锅炉声学测温时延估计研究[J]. 动力工程学报,

2018, 38(8): 617.
Shen G Q, Yang J D, Chen D, et al. Study on time delay estimation in boiler acoustic temperature measurement based on second correlation PHAT-β algorithm[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(8): 617.

[5] Yang X, Liu X, Shen J. The research of the explicit time delay and gain estimation algorithm based on fourth-order cumulants in acoustic pyrometry in the power plant boiler[C]. 2017 Chinese Automation Congress (CAC). IEEE, 2017: 6091.

[6] 唐林锋. 基于声学法的炉膛温度场测量系统设计与实现[D]. 南京: 东南大学, 2023: 1.
Tang L F. Design and implementation of a furnace temperature field measurement system based on the acoustic method[D]. Nanjing: Southeast University, 2023: 1.

[7] 沈国清, 蒋泓亮, 张世平. 基于声学测温的炉膛 SNCR 喷氨设计[J]. 热力发电, 2015, 44(2): 81.
Shen G Q, Jiang H L, Zhang S P. Acoustic thermometry based SNCR ammonia injection design[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(2): 81.

[8] 张卫东, 王凯旋, 何毅. 声学测温 TOF 时延估计算法研究现状及前景[J]. 电脑知识与技术, 2024, 20(17): 107.
Zhang W D, Wang K X, He Y. Research status and prospects of TOF time delay estimation algorithms for acoustic temperature measurement[J]. Computer Knowledge and Technology, 2024, 20(17): 107.

[9] Johnstone I M, Silverman B W. Wavelet threshold estimators for data with correlated noise[J]. Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology, 1997, 59(2): 319.

[10] Dragomiretskiy K, Zosso D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 62(3): 531.

[11] 沈国清. 基于声波理论的炉膛温度场在线监测技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007: 1.
Shen G Q. Research on online monitoring technology of furnace temperature field based on acoustic theory[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2007: 1.

[12] Li J, Chen Y, Qian Z H, et al. Research on VMD based adaptive denoising method applied to water supply pipeline leakage location[J]. Measurement, 2020, 151: 107153.

[13] Lu J Y, Yue J K, Zhu L J, et al. An improved variational mode decomposition method based on the optimization of salp swarm algorithm used for denoising of natural gas pipeline leakage signal[J]. Measurement, 2021, 185: 110107.

[14] 刘冲, 马立修, 潘金凤, 等. 联合 VMD 与改进小波阈值的局放信号去噪[J]. 现代电子技术, 2021, 44(21): 45.
Liu C, Ma L X, Pan J F, et al. PD signal denoising based on VMD and improved wavelet threshold[J]. Modern Electronics Technique, 2021, 44(21): 45.

[15] 余思琦, 张世平, 沈国清. 基于回声感知技术的介质温度监测[J]. 应用声学, 2024, 43(6): 1397.
Yu S Q, Zhang S P, Shen G Q. The medium temperature monitoring based on echo sensing technology[J]. Applied Acoustics, 2024, 43(6): 1397.

[16] 安连锁, 张世平, 李庚生, 等. 电站锅炉声学监测中互相关时延估计影响因素研究[J]. 动力工程学报, 2012, 32(2): 112.
An L S, Zhang S P, Li G S, et al. Factors influencing cross-correlation time delay estimation of acoustic measurement for power boilers[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(2): 112.

（责任编辑　邓玲惠）