

基于二次 - 凸扫频声源的声学法烟气速度测量研究

高伯赋¹, 刘 鹏¹, 徐 江¹, 周 宾², 刘 奇^{2*}

¹国能粤电台山发电有限公司, 广东 台山

²东南大学能源与环境学院, 江苏 南京

收稿日期: 2022年3月15日; 录用日期: 2022年4月10日; 发布日期: 2022年4月20日

摘 要

燃煤电厂中烟气速度测量的准确性是电厂的安全生产和效率提升的基础。本文采用一种新颖的二次 - 凸扫频声学驱动模式, 对燃煤电厂脱硝后烟气流速进行了长周期的测量研究。通过对脱硝烟道内部的背景噪声分析, 确定了二次 - 凸声源频率范围为4 kHz~8 kHz, 并通过互相关时延估计算法计算声波飞渡时间。经过理论分析和现场实验, 验证了该驱动模式的有效性。通过对测试数据的功率谱密度(PSD)、均方根误差(RMSE)和标准偏差(SD)的分析, 对基于三种驱动模式的测速结果的准确性和稳健性进行了定量评估。现场实验结果表明, 基于二次 - 凸扫频驱动模式的RMSE和SD值均小于0.3 m/s。与传统采用的线性扫频方法相比, 所提出的声波驱动方案可以显著提高烟气速度测量的准确性和稳健性。

关键词

二次 - 凸扫频声源, 脱硝烟气速度, 互相关算法, 声学测速法

Study on Acoustic Method of Flue Gas Velocity Measurement Based on Quadratic-Convex Frequency Sweeping Sound Source

Bofu Gao¹, Peng Liu¹, Jiang Xu¹, Bin Zhou², Qi Liu^{2*}

¹Guoneng Yuedian Taishan Power Generation Co., Ltd., Taishan Guangdong

²School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing Jiangsu

Received: Mar. 15th, 2022; accepted: Apr. 10th, 2022; published: Apr. 20th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 高伯赋, 刘鹏, 徐江, 周宾, 刘奇. 基于二次-凸扫频声源的声学法烟气速度测量研究[J]. 传感器技术与应用, 2022, 10(2): 246-254. DOI: 10.12677/jsta.2022.102030

Abstract

The accuracy of flue gas velocity measurements in coal-fired power plants is fundamental to the safe production and efficiency improvement of the plants. In this paper, a novel quadratic-convex frequency sweeping driven mode drive mode is used to study the long-period measurement of flue gas flow velocity after denitrification in coal-fired power plants. By analyzing the background noise inside the denitrification flue, the frequency range of the quadratic-convex frequency sweeping sound source is determined to be 4 kHz~8 kHz, and the acoustic fly-through time is calculated by a mutual-off time delay estimation algorithm. After theoretical analysis and field experiments, the effectiveness of this driving mode was verified. The accuracy and robustness of the velocimetry results based on the three driving modes were quantitatively evaluated by analyzing the power spectral density (PSD), root mean square error (RMSE) and standard deviation (SD) of the test data. The field experimental results show that the RMSE and SD values based on the quadratic-convex frequency sweeping driven mode are less than 0.3 m/s. The proposed acoustic wave driving scheme can significantly improve the accuracy and robustness of the flue gas velocity measurements compared with the traditionally adopted linear sweep method.

Keywords

Quadratic-Convex Frequency Sweeping Sound Source, Denitration Flue Gas Velocity, Cross-Correlation Algorithm, Acoustic Velocimetry

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

燃煤电厂烟气速度是衡量电厂燃烧效率和保证电厂安全生产的重要指标[1], 也对电厂脱硝(SCR)工艺的精准化喷氨具有指导意义。实时、准确地监测烟气速度对于主动调整运行条件至关重要, 这有助于减少大气污染物的排放。

侵入式测量方法在测量烟气流速时受到了严重的限制, 因为传感器可能会被烟尘密度较大的烟道堵塞。而激光多普勒测速(LDV) [2]、粒子图像测速(PIV) [3]、图像测量法[4]和可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS) [5] [6]等非侵入性和侵入性最小的方法则不影响流场的干扰和烟道的阻塞。然而, 在 LDV 和 TDLAS [7]中, 由于温度梯度和粒子散射引起的激光束错位, 测量精度往往会降低。由于 PIV 的实现方法需要大功率、体积大、成本高的激光器, 因此该系统不适合在多尘环境下的电厂中应用。

声学测速仪具有非侵入性和在恶劣环境下的鲁棒性等优点[8], 是测量烟气速度的最合适的解决方案。佟纯涛[9]采用声波信号互相关方法验证了采用声学法进行气体流速测量的可行性。陈栋[10]对声波测速装置进行了改进, 研究了声学测点布置角度对测量灵敏度的影响, 提高了声波测速的灵敏度。

在声源信号的研究中, Farina [11]基于指数扫频正弦信号, 提出了一种确定弱非线性近似时不变系统传递函数的新测量方法, 该方法适用于扬声器等音频元件。该方案易于使用, 提高了被测系统的信噪比(SNR)和抗时变能力。Ćirić 等人[12]采用正弦扫描信号作为激励, 研究了瞬态噪声在实际应用中对脉冲响应测量的影响。为了减少瞬态噪声的负面影响, 对几种信号源和方法进行了比较。Rogerone 等[13]在 Welch 方法的基础上, 提出了一种基于任意正弦扫频信号的并行哈默斯坦模型估计方法, 并对扫频信号

进行了可靠的模型估计和验证。罗振等[14]分析了不同类型的声驱动信号源,认为扫频信号是理想的声信号源。然而,很多学者在研究中没有考虑二次函数的凹凸性的影响,或者部分研究中给出的二次扫频信号公式仅针对二次凹扫频模式。

常规线性扫频和二次-凹型扫频模式,在测量中仍然存在由于外界偶然因素造成的计算错误,并且,为了提升测量结果的精确度,文章采用二次-凸扫频声源,通过声学法测量了燃煤电厂脱硝后测烟道的烟气平均流速,并最终实现了声学法烟气速度测量系统的研发,形成了烟气速度测量的优化方案。

2. 声学测速原理及时延估计

2.1. 声学测速原理

声波测速是一种非侵入式测量方法,在气体介质中通过测量多通道飞渡时间(TOF)实现对气体流速的测量。通过静止区域的介质温度可以求得声速:

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

式中: c 为声波在静止烟气中的传播速度, m/s; γ 为介质比热容比,与介质成分有关; R 为烟气的气体常数; T 为热力学温度, K; M 为介质摩尔质量, kg/mol。

声波在烟气中的实际传播速度等于烟气流速与声波在静止烟气中的传播速度的叠加。本文在介质流向的顺流、逆流两个方向上各布置一组扬声器和传声器,通过获取声波在两个方向上的声波飞渡时间以获取介质流速。

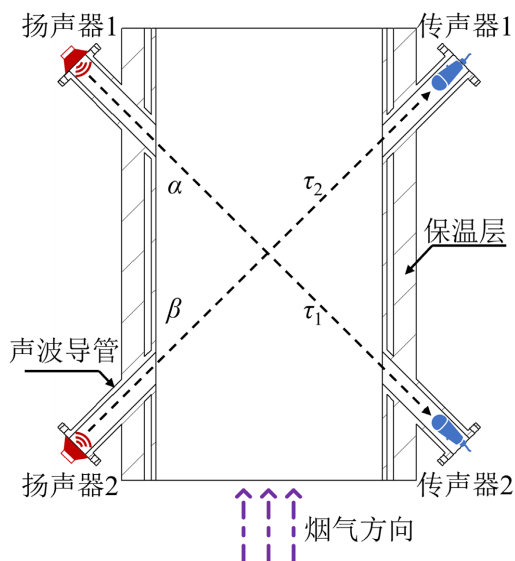


Figure 1. Schematic diagram of flue velocity measurement by acoustic method
图 1. 声波法烟道测速示意图

脱硝后烟道的声波法烟气测量结构如图 1 所示。扬声器 1 发射声波信号,由于声波逆风传播,声波飞渡到传声器 1 所用的时间为 τ_1 ; 之后,当扬声器 2 发射声波信号时,由于声波顺风传播,声波飞渡到传声器 2 所用的时间为 τ_2 ($\tau_1 > \tau_2$),则声波在声波路径 L_1 的飞渡时间 τ_1 可表示为:

$$\tau_1 = \frac{L_1}{c - v \cos \alpha} \quad (2)$$

同理, 在声波路径 L_2 的飞渡时间 τ_2 可表示为:

$$\tau_2 = \frac{L_2}{c + v \cos \beta} \quad (3)$$

L_1 和 L_2 分别是声波在逆流和顺流 2 个方向上的传播距离, α, β 为顺流及逆流方向传感器的安装角度。由式(2)和(3)可知, 气体流速速度 v 表达式如下:

$$v = \frac{L_2 \tau_1 - L_1 \tau_2}{\tau_1 \tau_2 (\cos \alpha + \cos \beta)} \quad (4)$$

同时可得声速 c 表达式如下:

$$c = \frac{L_1 \tau_2 \cos \beta + L_2 \tau_1 \cos \alpha}{\tau_1 \tau_2 (\cos \alpha + \cos \beta)} \quad (5)$$

2.2. 互相关时延估计

互相关时延估计的是通过比较两个相对独立的时间序列信号之间的相关程度来实现的。等式(4)中的 τ_1 和 τ_2 可以通过直接互相关算法[15] [16] [17]得到。扬声器发射的信号 $x_1(n)$ 和麦克风接收到的信号 $x_2(n)$ 可以表示为:

$$\begin{cases} x_1(n) = s(n) + \mu_1(n) \\ x_2(n) = \alpha s(n + D) + \mu_2(n) \end{cases} \quad (6)$$

其中: $s(n)$ 表示声源信号, $\mu_1(n)$ 和 $\mu_2(n)$ 表示信号采集时的随机噪声, α 表示声波信号衰减系数, D 表示声波传播方向上的时间延迟。

$x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 的互相关函数可表示为:

$$\begin{aligned} R_{x_1 x_2}(\tau) &= E[x_1(n)x_2(n-\tau)] \\ &= \alpha [R_{ss}(\tau - D) + R_{s\mu_1}(\tau - D) + R_{s\mu_2}(\tau) + R_{\mu_1\mu_2}(\tau)] \end{aligned} \quad (7)$$

式中, R_{ss} 为声源信号 $s(n)$ 的自相关函数, $R_{s\mu_1}$ 和 $R_{s\mu_2}$ 为声源信号与随机噪声信号的互相关函数, $R_{\mu_1\mu_2}$ 为两路随机噪声的互相关函数, 本文假设 $s(n)$ 、 μ_1 和 μ_2 为不相关的随机信号, 则(7)可简化为:

$$R_{x_1 x_2}(\tau) = \alpha R_{ss}(\tau - D) \quad (8)$$

由等式(8)可以看出, TOF 时延估计是通过声源信号的自相关函数得到。由图 1 的声学测点布置方式可知, 采集信号时仅能得到含噪声信号 $x_2(n)$, 所以, 在测试环境中, 提前在扬声器前采集好信号作为 $x_1(n)$ 进行后续的计算。

2.3. 不同扫频方式的声源信号

本文只考虑单向向上(从低频向高频变化)的频率调制情况。文章采用互相关时延估计方法, 在实验室环境下对不同脉宽的声源信号进行了多次测试, 通过对比所测飞渡时间的相对均方根误差, 脉宽为 0.2 s 时误差最小, 确定其为本文声源信号的脉宽。扫频信号的带宽越小, 互相关时延估计的效果越差[18], 文章所选声源信号的带宽为 4 kHz, 起始频率根据背景噪声的实际情况确定。

线性扫频声源信号的带宽与扫描带宽成线性关系, 与脉冲宽度无关。线性扫频信号(以下简称线性信号)波形的角频率表示为:

$$\omega_{\text{Linear}}(t) = 2\pi \left(\frac{B}{T}t + f_0 \right) \quad (0 \leq t \leq T) \quad (9)$$

式中: f_0 为起始频率, B 为带宽, T 为脉宽。

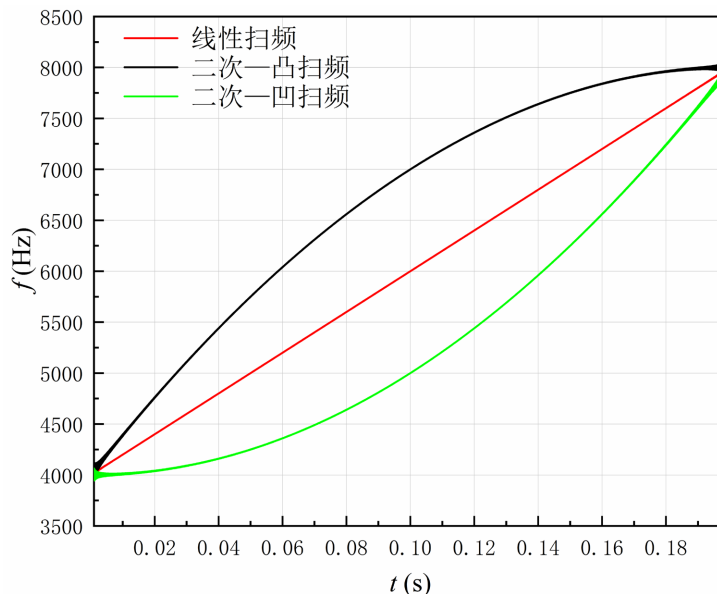


Figure 2. Three swept driving methods of the sound source signal
图 2. 声源信号的三种扫频驱动方式

二次函数扫频声源信号的带宽与扫描带宽成凹、凸两种形式, 由于本文以单向向上扫频方式为原则, 二次函数凸型扫频信号(以下简称凸信号)波形的角频率表示为:

$$\omega_{\text{Convex}}(t) = 2\pi \left(\frac{-B}{T^2} t^2 + \frac{2B}{T} t + f_0 \right) \quad (0 \leq t \leq T) \quad (10)$$

二次函数凹型扫频声源信号(以下简称凹信号)的波形的角频率表示为:

$$\omega_{\text{Concave}}(t) = 2\pi \left(\frac{B}{T^2} t^2 + f_0 \right) \quad (0 \leq t \leq T) \quad (11)$$

如图 2, 其为 0.2 s 脉宽内, 起始频率为 4 kHz, 带宽为 4 kHz 的三种扫频方式的瞬时频率。

3. 背景噪声分析

电厂环境噪声复杂, 烟道内背景噪声主要由湍流、涡流等产生的烟气动力性噪声和引风机、管道、阀门等产生的机械噪声组成。噪声会对声波信号造成一定的干扰, 为保证声波信号的准确性, 使声源信号与噪声处于不同频段, 需要先对烟道内部背景噪声进行采样分析。图 3 的烟道内部背景噪声取自南京某电厂 SCR 后的烟道内部, 图 3 [19]是对背景噪声做 FFT 归一化后的结果, 由图可知, 噪声的主要频段和能量分布在 2 kHz 以下, 4 kHz 处幅值有小幅度上升。

4. 现场实验

4.1. 实验介绍

声波测速设备安装于江苏省某电厂 #2 机组脱硝和一级烟冷器之间, 烟道截面为 3.05 m × 3.05 m 的正方形管道。在测量位置前安装皮托管进行同步测量, 并与声波测速结果进行对比。扬声器及传声器均布置在流道两侧。其安装情况如图 4 所示。传声器采用北京一洋应振测试技术有限公司的 1/2 英寸无指向

性传声器，传感器开路灵敏度为 50.1 mv/pa，动态范围为 20~136 dB，频率响应范围为 20 Hz~15 kHz；扬声器和传声器均安装在焊接到烟道壁面的声波导管上；数据采集卡为 NI-USB6356，其为 8 路同步模拟输入，每通道采样率为 1.25 MS/s，16 位分辨率。

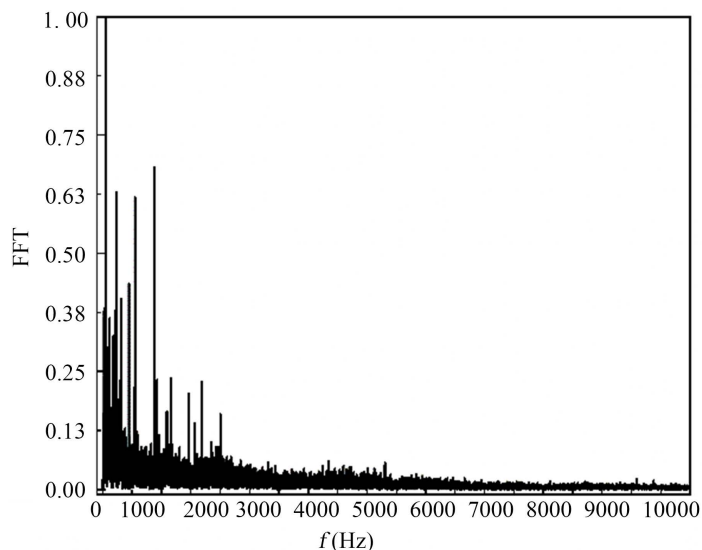


Figure 3. FFT analysis of the background noise of the flue
图 3. 烟道背景噪声 FFT 分析



Figure 4. Mounting structure of speaker and microphone
图 4. 扬声器及传声器安装结构

4.2. 传感器距离标定

扬声器及传声器安装完成后，声波传播路径与烟气流动方向成一定角度，而且由于传感器是固定在声波导管上的，所以传感器间的准确距离很难通过常规测量手段得到。在传感器安装完成后，此时由于烟道内部烟气为静止状态，且温度几乎不变，其声速 c 为定值。在已知环境温度的情况下，可通过等式 (1) 对声波传播路径长度标定。

经过静止状态下的声音传播速度的多次测量求得平均值，可得烟气静止时声速 c 为 345.54 m/s，顺、

逆流的扬声器与传声器距离分别是 4.52 m 和 4.61 m, 顺、逆流声线与管道的安装角分别为 43.15° 和 46.22°。

4.3. 实验结果与分析

声学法烟气流速测量过程中, 信号信噪比(SNR)约为-10.33 dB。由于烟道内部的流场波动, 测量过程中 SNR 会有小幅变化。每种扫频方式在此相同的 SNR 工况下均测量 8000 次, 每次测量的持续时间约为 3 小时。由于电厂负荷不会随意调整, 在测量阶段烟道内部的烟气流动状态基本稳定, 所以, 皮托管测量结果的统计平均值作为本文烟气速度测量的参考值。皮托管测量结果经过多次平均后, 其均值为 13.332 m/s。

Table 1. Mean values and errors of the measurement results of three types of sound source signals

表 1. 三种声源信号测量结果的均值及误差

	AV (m/s)	RMSE (m/s)	SD (m/s)
Convex	13.412	0.117	0.113
Linear	13.191	0.193	0.154
Concave	13.007	0.259	0.212

在表 1 中, 统计出了三种扫频方式测速结果的平均值 AV、均方根误差 RMSE 和标准差 SD。二次 - 凸信号的平均值和 RMSE 值均最小, 最接近皮托管的测量结果, 其 RMSE 是线性信号的 0.61 倍, 是凹函数的 0.45 倍, 准确度最高; 同时, 二次 - 凸信号的 SD 值也最小, 离散程度最低, 是线性信号的 0.74 倍, 是凹信号的 0.53 倍, 具有最好的精确度, 系统误差最低。

在烟道内部恶劣的测量环境下, 二次 - 凸信号造成的系统误差最小, 与皮托管测量的参考值的符合程度最高, 且自身具有最小的波动, 多次测量的离散度最低, 具有最高的准确度和精确度。

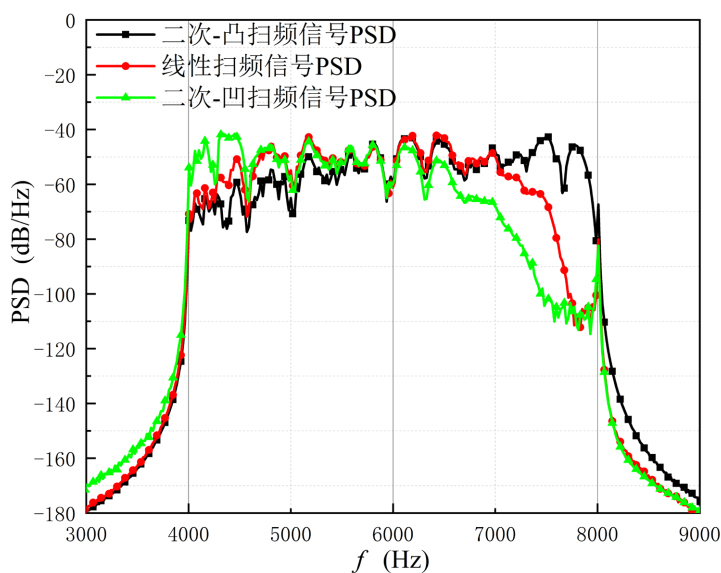


Figure 5. Power spectral density of the three signals inside the flue

图 5. 烟道内部三种信号的功率谱密度

为了进一步分析二次 - 凸扫频驱动方式测量结果较好的原因, 我们分别对三种扫频声源信号的功率谱密度(PSD)进行了分析。图 5 为三种扫频声源信号的功率谱图。根据图 5 可知, 二次 - 凹型扫频在高频

位置具有明显的衰减, 而由于烟道内部存在较大颗粒的烟尘, 高频衰减会更加严重, 所以导致二次 - 凹型扫频声源信号的测量结果最差。而二次 - 凸扫频声源信号正好相反, 其在高频段的 PSD 强度最好, 这就保证了在烟尘颗粒浓度较大的烟道内部, 其高频信号的信噪比仍然是较高的。由于二次 - 凸扫频声源具备更多的高频分量, 这就保证了在声波路径中高频段的信号功率, 从而提升测量信号的 SNR。

我们在现场进行了为期 10 天的测量, 测量前期由于电厂负荷调整, 导致烟道内的烟气速度波动较大, 流场不稳定, 测速结果在 6 m/s~15 m/s 之间存在较大波动。当测试超过 2 天后, 电厂负荷趋于稳定, 烟道内烟气流动逐渐平稳, 声学测速结果在 13~14 m/s 之间波动。在剔除明显错误后, 通过对三种声源信号的测量结果进行比较分析可知, 二次 - 凸声源信号的测速结果的相对误差大部分小于 4%, 在工业应用过程中, 此风速测量结果波动能够被接受, 且相较于另外二种扫频声源信号, 具备最佳的稳定性。

5. 结束语

1) 本文深入研究了二次凸、二次凹和线性三种扫频模式对烟气流速测量的影响。研发了一种基于二次 - 凸扫频驱动模式的烟气速度计。通过对烟道现场背景噪声的分析, 发现了二次 - 凸扫频声源在 TOF 计算精度和抗噪能力方面的优越性, 能够避免噪声频段的干扰, 保证测量信号的 SNR。

2) 在直流风洞中搭建了模拟真实烟道结构的声学波导实验台, 对多工况测量条件下三种扫频模式的声源进行了测速对比实验。实验证明, 二次 - 凸扫频声源具有最佳的测速准确度和精度, 其测量结果的 RMSE 和 SD 值都小于 0.3 m/s。通过声波导模拟真实烟道结构, 估算了三种接收信号的 PSD 值, 确定了二次凸扫频声源具有更好的测量改进和鲁棒性的原因。

3) 通过为期 10 天的长期监测, 二次 - 凸扫频声源信号的测速结果的相对误差大部分小于 4%, 在工业应用过程中, 此风速测量结果波动能够被接受, 且相较于另外二种扫频声源信号, 具备最佳的稳定性。

参考文献

- [1] 赵万里. 火电厂 SCR 烟气脱硝的催化剂应用性能分析研究[D]: [硕士学位论文]. 新乡: 河南师范大学, 2014.
- [2] Fischer, A. (2017) Model-Based Review of Doppler Global Velocimetry Techniques with Laser Frequency Modulation. *Optics and Lasers in Engineering*, **93**, 19-35. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.01.004>
- [3] Westerweel, J., Elsinga, G.E. and Adrian, R.J. (2013) Particle Image Velocimetry for Complex and Turbulent Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **45**, 409. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-120710-101204>
- [4] Dai, M., Zhou, B., Zhang, J., et al. (2022) Experimental and Simulation Investigation of 3-D Soot Temperature and Volume Fraction Fields of Afterburner Flame. *Case Studies in Thermal Engineering*, **33**, Article ID: 101932. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101932>
- [5] 许国强, 段拼搏, 张恩先, 等. 非均匀流场 CO₂ 浓度分布测量方法研究[J]. 应用激光, 2021, 41(3): 590-598.
- [6] 王明, 向鹏, 祁建民, 等. 基于改进卷积神经网络的激光吸收光谱层析成像[J]. 应用激光, 2021, 41(4): 890-901.
- [7] 韩雨佳, 陈钻, 薛志亮, 等. 基于吸收光谱技术的气流速度测量研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(6): 686-691.
- [8] 蔡伟, 刘奇, 周宾, 等. 基于声学法的送风机风速测量实验研究[J]. 仪表技术与传感器, 2021(6): 100-103+114.
- [9] 佟纯涛. 燃煤机组烟气流量软测量技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [10] 陈栋, 任思远, 沈国清, 等. 基于声学技术的非接触式烟气流速测量实验[J]. 热力发电, 2018, 47(1): 66-71.
- [11] Farina, A. (2000) Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique. Audio Engineering Society, New York.
- [12] Ćirić, D.G., Marković, M., Mijić, M., et al. (2013) On the Effects of Nonlinearities in Room Impulse Response Measurements with Exponential Sweeps. *Applied Acoustics*, **74**, 375-382. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.07.013>
- [13] Roggerone, V., Rébillat, M. and Corteel, É. (2017) Parallel Hammerstein Models Identification Using Sine Sweeps and the Welch Method. *IFAC-PapersOnLine*, **50**, 14040-14045. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2434>
- [14] 罗振, 田丰, 孙小平. 炉膛声波飞行时间测量中声源信号的选取研究[J]. 计算机仿真, 2007(1): 329-332.
- [15] 唐小明, 吴昊, 刘志坤. 基于广义互相关算法的时延估计研究[J]. 电声技术, 2009(8): 73-76.

- [16] 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): 617-623.
- [17] Liu, Q., Zhou, B., Cheng, R., *et al.* (2022) High Temporal Resolution Pyrometry and Velocimetry Based on Acoustic Frequency Division Multiplexing. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **71**, Article ID: 6500511. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3141169>
- [18] 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): 112-117.
- [19] Liu, Q., Zhou, B., Zhang, J., *et al.* (2021) Development of Flue Gas Audio-Range Velocimeter Using Quadratic-Convex Frequency Sweeping. *IEEE Sensors Journal*, **21**, 9777-9787. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3055343>