第 49 卷 第 1 期：432-439 高电压技术 Vol.49, No.1: 432-439
2023 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211720

基于被动和主动降噪的光声光谱气体检测仪背景噪声控制技术

马凤翔[1,2]，李　康[3]，程登峰[1,2]，朱　峰[1,2]，赵　跃[1,2]
（1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院，合肥 230000;
2. 国家电网有限公司六氟化硫气体特性分析与净化处理技术实验室，合肥 230000;
3. 中国科学院电工研究所，北京 100190）

摘　要：光声光谱技术通过检测微弱的声压信号来反演气体浓度，与仪器调制频率对应的相干噪声对仪器检测灵敏度具有重要影响。该文首先分析了斩波器机械噪声和环境噪声对光声光谱仪检测的影响，而后提出采用厚度为 30 mm 的蜜胺泡棉板隔离光声检测模块实现被动降噪。然后提出利用声波在空间的叠加干涉抵消原理，使噪声在声接收环节与主动噪声控制模块产生的主动声波进行叠加，实现光声池主动降噪。最后搭建噪声干扰模拟实验平台对提出措施的有效性进行验证，结果显示在调制频率为 100 Hz 和 400 Hz 两种条件下，提出的降噪技术均可降低外界相干噪声影响，光声光谱仪的检测能力在应用被动降噪技术后提升了 0.4 倍，而应用主动降噪+被动降噪技术后提升了 2.4 倍。该研究可为光声光谱仪开发中噪声抑制措施的选择提供指导。

关键词：主动降噪；被动降噪；光声光谱仪；相干噪声；相干抵消

Background Noise Control of Photoacoustic Spectroscopy Based on Passive and Active Noise Cancellation

MA Fengxiang[1,2], LI Kang[3], CHENG Dengfeng[1,2], ZHU Feng[1,2], ZHAO Yue[1,2]
(1. Electric Power Research Institute, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230000, China;
2. SF_6 Gas Characteristic Analysis and Purification Technology Laboratory, State Grid Corporation of China, Hefei 230000, China;
3. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract：Photoacoustic spectroscopy obtains gas concentration by detecting weak sound pressure signal. The coherent noise corresponding to the modulation frequency of photoacoustic spectroscopy has an important impact on detection sensitivity. Firstly, the influence of chopper mechanical noise and environmental noise on detection of photoacoustic spectrometer is analyzed, and an approach using melamine foam board with a thickness of 30 mm to isolate the photoacoustic spectrometer to realize passive noise reduction is proposed. Then, using the principle of superimpososed interference cancellation of sound waves, the noise is superimposed with the active sound waves generated by the active noise control module in the sound receiving link, so as to realize the active noise reduction of photoacoustic cell. Finally, a noise interference simulation experimental platform is built to verify the effectiveness of the proposed measures. The results show that the proposed noise cancellation technology can reduce the impact of external coherent noise under the conditions of modulation frequency of 100 Hz and 400 Hz. The detection ability of photoacoustic spectroscopy is improved after using noise cancellation technology. It improved by 0.4 times for passive noise cancellation and 2.4 times for active noise+passive noise cancellation. The research in this paper can provide guidance for the selection of noise suppression measures in the development of photoacoustic spectroscopy.

Key words：active noise cancellation; passive noise cancellation; photoacoustic spectroscopy; coherent noise; coherent suppression

基金资助项目：国家电网有限公司总部科技项目 (521205190014)。
Project supported by Science &Technology Project of SGCC (521205190014).

0　引言

光声光谱是一种基于光声效应的先进微量气体检测技术，通过检测与调制光源同频的声压信号实现对低浓度气体的测量，检测过程对样品气体没有污染，不改变气体性质，可在线循环取样，同时不需要消耗载气和标气，仪器维护量少[1-3]。因此，光声光谱是变压器油中溶解气体、SF_6 分解气体在线监测的优选方案，受到广泛关注[4-6]。国内研究者在光声光谱技术领域开展大量研究，包括光声池优化[7-9]、光源优化[10]、石英增强光声光谱技术[11]等。光声光谱仪检测微弱信号能力通常用信噪比来评价，装置的信噪比越大，其对痕量气体(分析化学中指体积分数低于 10^{-4} 的组分)检测能力越好[12-13]。提高光声光谱仪的信噪比可从两个方面着手：一是提高微音器本身的抗干扰能力和声压感知灵敏度，以减少或消除微音器自身产生的噪声或失真，如采用具有更高灵敏度的光学微音器替代电学微音器[14]；二是降低与光声光谱仪光声信号的特征频段相同的背景噪声即相干噪声。光声光谱仪的背景噪声主要包括分子热运动引起的布朗噪声、电源电压起伏引起的光功率抖动噪声、光声池壁和光学窗片吸收红外光能量后产生的固体光声效应噪声、斩波器转动产生的机械振动噪声、环境相干噪声分量波动导致的声学噪声等[15-17]。其中布朗噪声和光功率抖动噪声属于非相干噪声，固体光声效应噪声与调制频率同步属于相干噪声，但可通过采用高反射率光声池和高透射率光学窗片的办法抑制。本文主要针对斩波器机械振动噪声、环境相干噪声分量的主动及被动抑制方法展开研究。

本文首先分析了斩波器机械噪声及环境噪声对光声光谱检测信号的影响，而后分别提出基于蜜胺泡棉隔离的被动降噪技术和基于声波叠加干涉抵消原理的主动降噪技术，并搭建被动和主动降噪实验平台，测试两种降噪控制方法对光声光谱仪检测灵敏度的影响。实验结果证明主动降噪和被动降噪技术均可有效提高装置灵敏度且主动降噪技术效果更佳。

1　斩波器机械噪声和环境噪声分析

1.1　斩波器振动噪声的影响分析

目前主流的光声光谱气体检测仪采用红外热辐射光源作为信号激发光源，光源的频率调制只能由机械斩波器实现。而机械斩波器工作时，斩波片的转动会带动周围空气产生机械振动，振动会通过光学窗片/光声池/斩波器固定支座等传播至光声池内，叠加在光声信号上形成振动噪声。图 1 所示为机械斩波器工作时产生的振动噪声对光声光谱检测仪背景信号的影响分析。

图 1(b)展示了光声光谱检测装置连续采集的 100 个背景信号(这里指光源关闭、气体池内充满氮气时测量得到的光声信号)幅值及其均值和标准偏差，可以看到机械斩波器开启状态下背景信号幅值是机械斩波器关闭状态下的 10 倍，背景信号偏差约为 60.69 μV，是机械斩波器关闭状态下的 1.7 倍。说明机械斩波器工作时引起的背景信号波动，叠加在目标气体激发产生的光声信号上，使光声光谱气体传感器的噪声水平增加，从而会降低检测装置的信噪比。

1.2　环境噪声对光声光谱检测影响分析

研究表明变电站主要噪声来自变压器、电抗器等设备，其噪声能量集中于 100 Hz 及其一系列谐频成分上，在向外传播的过程中，100 Hz 频率成分的衰减最慢[18]。作为对比，后续还研究了 400 Hz 频

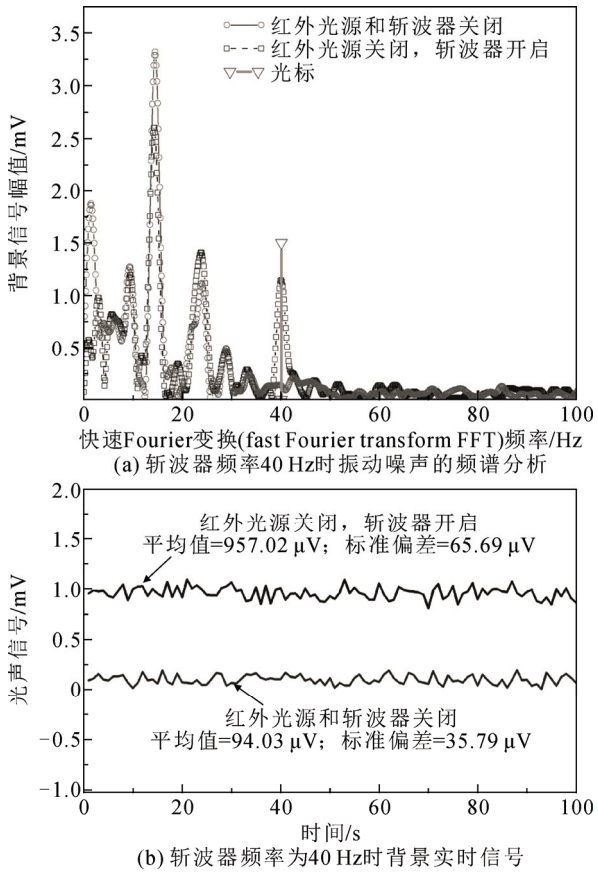


图 1　斩波器振动噪声分析

Fig.1　Noise analysis caused by chopper rotation

率下的噪声抑制特性。研究中采用扩音器作为噪声源，人为产生具有某一主频的噪声。图 2(a)在噪声主频率为 100 Hz 和安静环境中，光声光谱检测装置采集的光声信号频谱分析结果，图 2(b)为两种条件下光声光谱气体检测装置连续采集到的光声信号数据。实验中采用主频 100 Hz、400 Hz 噪声的声压级为 55 dB(噪声源设定值，以 20 μPa 为基准)，噪声源与光声光谱气体传感器之间距离为 1 m。

由图 2(b)可以看出，当环境噪声中与光声光谱检测装置光源调制频率相同的噪声分量，叠加在目标气体激发产生的光声信号上时，不仅会增大光声光谱检测装置的背景信号平均值(均值由约 81 μV 增至 1132 μV)，而且会由于环境噪声的波动而使采集到的光声信号波动增大(信号标准偏差由约 2.3 μV 增至 33 μV)，降低了传感器的信噪比。为尽可能提高复杂噪声环境中光声光谱检测装置的痕量气体检测能力，根据噪声传播的三要素(即声源、传播介质和声接收)，可以通过采用被动降噪技术如隔音板对环境噪声进行阻隔，或者在声接收环节引入主动降噪技术，从而降低光声检测装置内的环境噪声水平，下面分别展开研究。

2 基于被动降噪技术的噪声抑制措施研究

被动降噪技术指使用声阻或吸音材料将噪声源隔离的降噪技术。

2.1 被动降噪测试平台

图 3 为采用蜜胺泡棉进行被动噪声控制处理的光声光谱检测装置测试平台，平台采用具有 3 维丝状结构的蜜胺泡棉作为光声光谱气体传感器的声阻单元，对装置进行密封。平台中选用标准厚度(30 mm)的蜜胺泡棉测试降噪效果，其吸音系数 α 如表 1 所示。检测装置采用非共振光声池，光声信号检测采用基于迈克尔逊干涉仪的光学微音器。当环境噪声传播至蜜胺泡棉板时，噪声声波与泡棉板的空气隙产生摩擦与共振，噪声能量被转换成热能耗散掉，使进入光声光谱模块的噪声水平衰减，从而实现噪声的被动降低[19]。同时蜜胺泡绵可以吸收部分气体传感器内部产生的噪声，降低内部噪声干扰。

2.2 光声响应分析

图4—图6分别为安静环境、噪声主频率为100 Hz和 400 Hz 的噪声环境下，基于被动噪声控制技术的光声光谱检测装置对 N_2 中痕量 C_2H_4 气体的光声响应测试结果。测试过程中，光声光谱检测装置采样

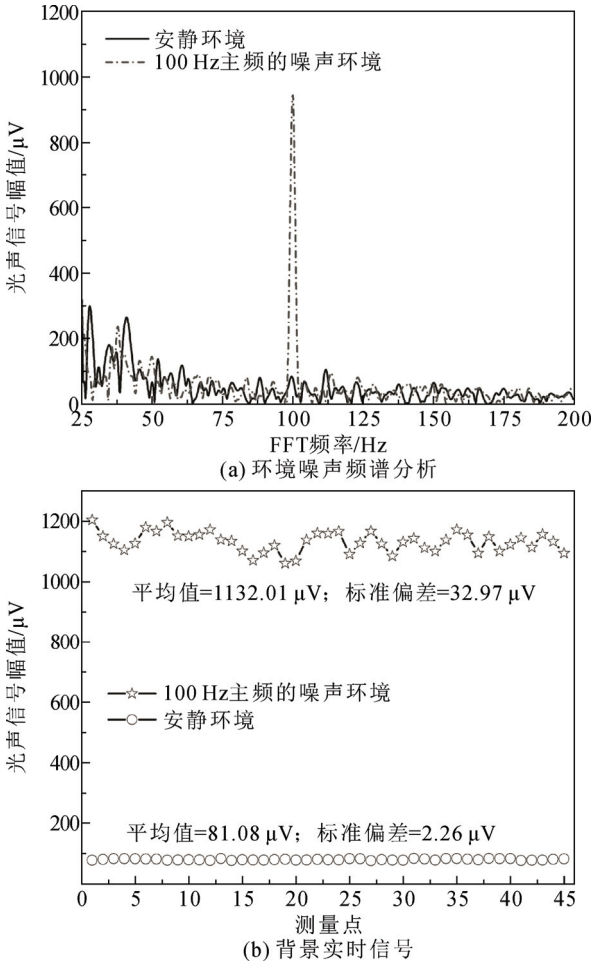


图 2 环境噪声分析

Fig.2 Analysis of environmental noise

表 1 蜜胺泡棉的吸声性能

Table 1 Sound absorption characteristics of Melamine Foam

声音频率/Hz	125	250	500
吸声系数 α	0.09	0.27	0.68

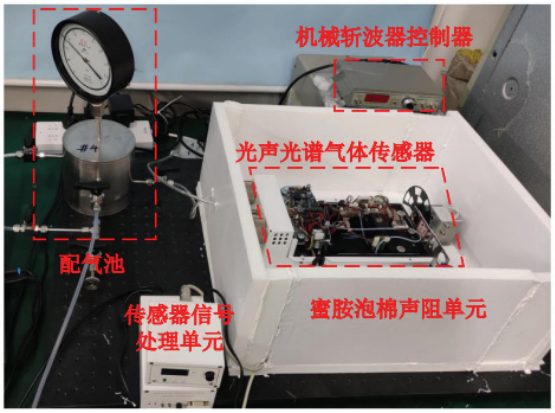


图 3 基于被动降噪技术的光声光谱装置测试平台

Fig.3 Test setup of passive noise cancellation enhanced photoacoustic spectroscopy

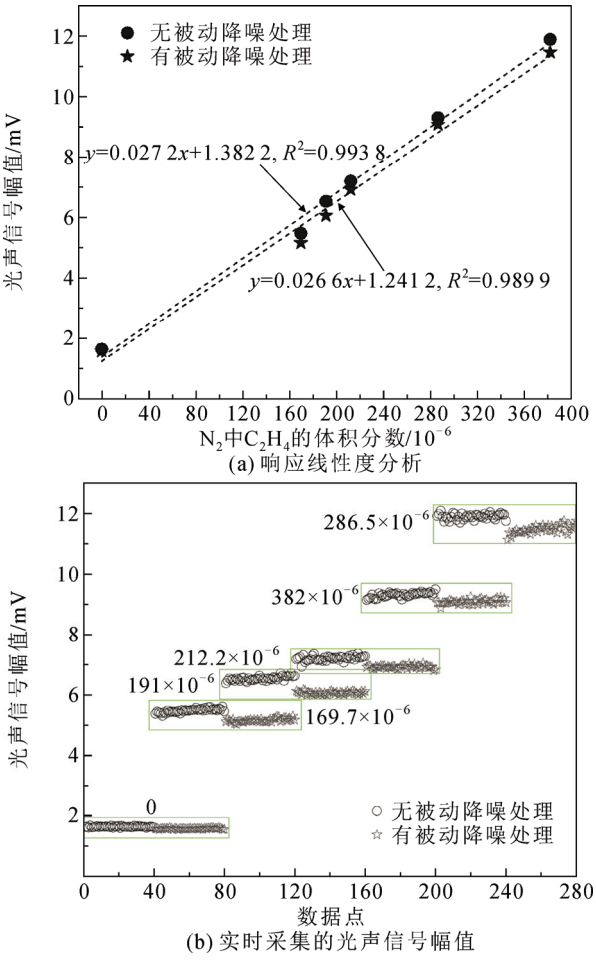


图 4　安静环境中被动噪声控制光声光谱检测装置的光声响应分析

Fig.4　Photoacoustic response analysis of passive noise cancellation photoacoustic spectroscopy in the quiet environment

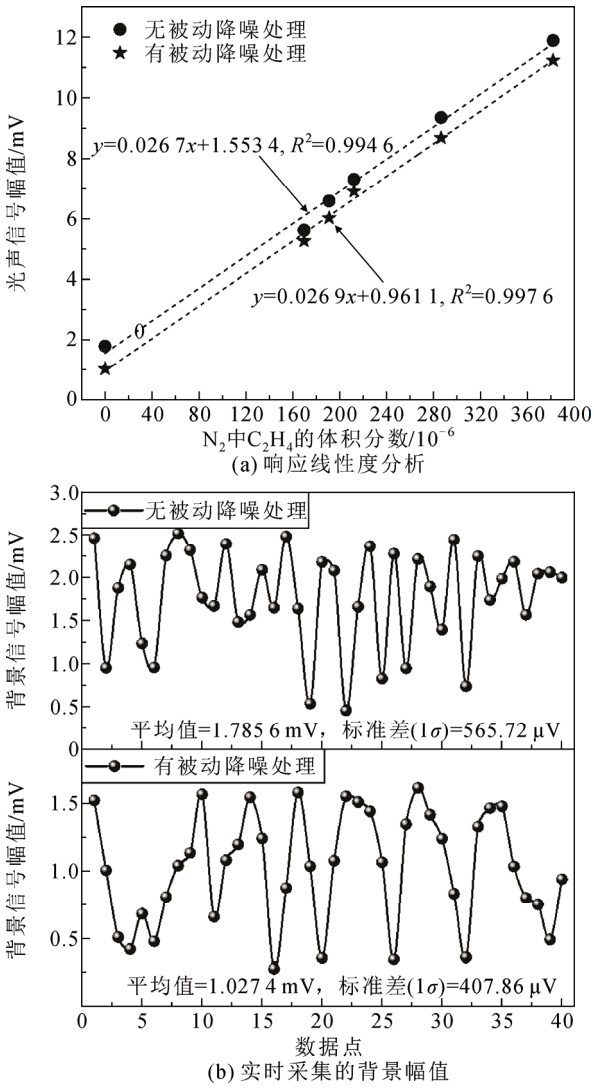


图 5　100 Hz 环境中被动噪声控制光声光谱检测装置的光声响应分析

Fig.5　Photoacoustic response analysis of passive noise cancellation photoacoustic spectroscopy in the 100Hz noisy environment

时间设置为 3.8 s，每次连续采样 40 个点。

利用图 4—6 的光声响应分析结果，并根据文献[20]的定义，按照式(1)可计算得到不同工况下，基于被动噪声控制技术的光声光谱检测装置对 N_2 中痕量 C_2H_4 气体的最低检测限。

$$L_D = k_f \cdot s_{td0} / S_{pa} \tag{1}$$

式中：L_D 为最低检测限，通常用来表征传感器的痕量检测能力；k_f 为置信因子，k_f=1 时，置信水平为 65.26%，也称为 1 倍信噪比(1σ)；k_f=3 时，置信水平为 99.74%，也称为 3 倍信噪比(3σ)；s_{td0} 为纯氮气作为被测气体时测得光声信号的标准偏差；S_{pa} 为检测装置对被测气体的检测灵敏度。

表 2 总结了不同工况下，被动噪声控制处理前后，光声光谱气体传感器的背景信号偏差、目标气体检测灵敏度和最低检测限。表中 10^{-6} 表示气体体积分数，与 μL/L 等价。

从表 2 结果分析可知，在安静环境中，是否采用被动噪声控制处理，基本不会影响光声光谱气体传感器的痕量气体检测能力。而在噪声环境中，相对传统的光声光谱气体检测装置，采用被动噪声控制技术可有效提高光声光谱装置的痕量气体检测能力约 1.4 倍，且调制频率增大时提升效果更好，这是由蜜胺泡棉的隔音特性决定的，目前泡棉对高频信号的隔音能力较好，但对低频的噪声则较差，且频率越低隔音效果越差。由表 2 还可看出，存在噪声干扰时，检测装置的最低检测限明显增大；在 100 Hz 和 400 Hz 噪声条件下，采用被动噪声控制后分别增大为安静环境的 23.4 和 9.4 倍。

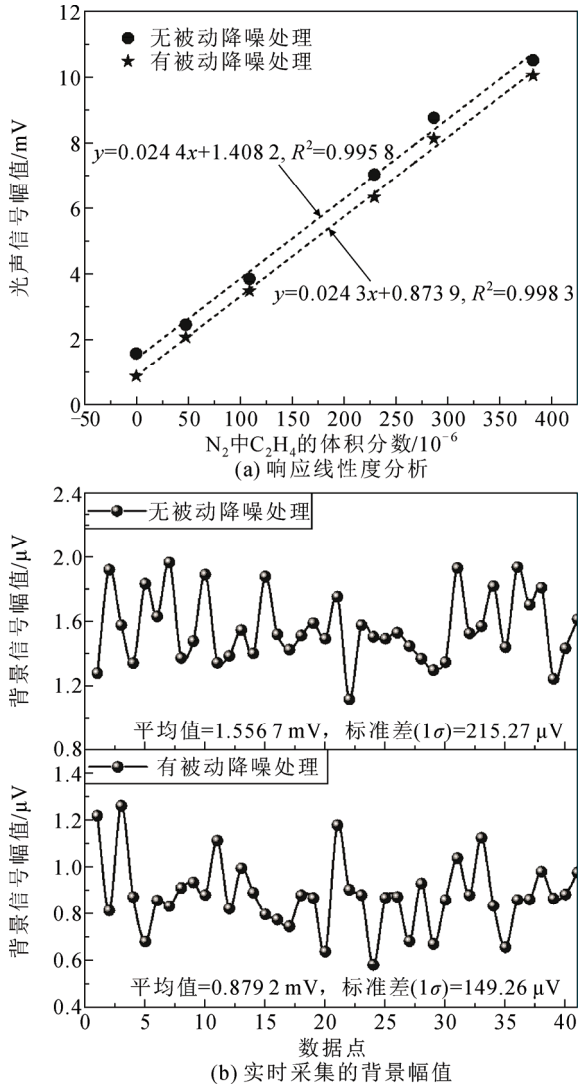


图6 400 Hz环境中被动噪声控制光声光谱检测装置的光声响应分析

Fig.6 Photoacoustic response analysis of passive noise cancellation photoacoustic spectroscopy in the 400 Hz noisy environment

表 2 被动噪声控制前后光声光谱检测装置的检测性能

Table 2 Comparison of the detection performance of photoacoustic spectroscopy before and after passive noise cancellation processing

工况		灵敏度 /(μV/10⁻⁶)	背景偏差 /μV	最低检测限 (1σ)/10⁻⁶	最低检测限 (3σ)/10⁻⁶
被动噪声控制前	安静环境	27.2	18.7	0.688	2.06
	100 Hz 噪声环境	26.7	566	21.2	63.6
	400 Hz 噪声环境	24.4	215	8.82	26.5
被动噪声控制后	安静环境	26.6	17.3	0.650	1.95
	100 Hz 噪声环境	26.9	408	15.2	45.5
	400 Hz 噪声环境	24.3	149	6.14	18.4
控制前/控制后 (100 Hz)				1.40	
控制前/控制后 (400 Hz)				1.44	

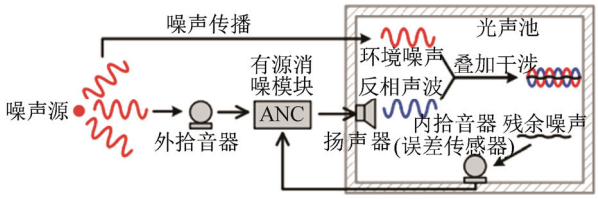


图 7 主动噪声控制原理示意图

Fig.7 Schematic diagram of the working principle of active noise cancellation

3 基于主动降噪技术的噪声抑制措施

主动噪声控制技术是利用声波在空间的叠加干涉抵消原理，使噪声在声接收环节与主动噪声控制模块产生的主动声波进行叠加，从而降低甚至消除光声池内环境噪声。与被动噪声控制技术的结构不同，主动噪声控制技术是在现有光声池单元上增加用于放置的主动声源的声道。与被动噪声控制技术相比，其具有结构更简单、对装配空间要求更低和噪声消除能力更好等优点[21]。

3.1 主动降噪测试平台

1）主动噪声技术理论分析

图 7 为光声光谱检测装置光声池内发生的主动噪声控制原理示意图。其工作原理为：外拾音器将采集到的环境噪声转换成电信号，经有源消噪模块做反相处理，而后扬声器将其转换为声信号。扬声器产生的声信号与外拾音器采集的噪声信号幅值相等，但相位刚好相反。扬声器产生的声信号与光声池内的环境噪声相互叠加干涉，消耗部分噪声能量，剩下的残余噪声被误差传感器拾取，并交由有源消噪模块进行处理后最终达到光声池内噪声控制的目的。

2）主动噪声实验平台

图 8 为采用 BOSE QC20 有源消噪模块(工作频率范围 30 Hz~15 kHz)的主动噪声控制光声光谱检测装置测试平台示意图。其中，外拾音器用于采集环境噪声，扬声器和用于误差传感的内拾音器放置在扬声器声道内，内、外拾音器和扬声器之间的信号处理由有源消噪模块完成。有源消噪模块对环境噪声的主动控制按如下方式实现：首先，采用运算

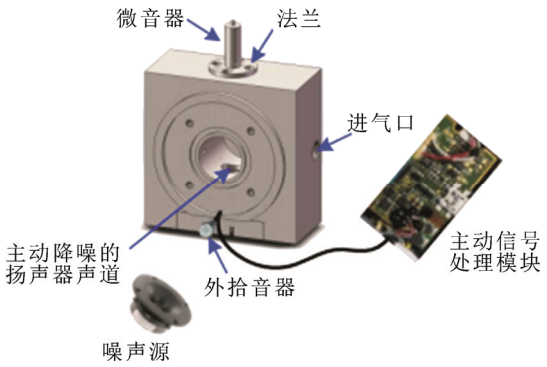


图 8　基于主动噪声技术的光声光谱测试平台示意图

Fig.8　Schematic diagram of active noise cancellation photoacoustic spectroscopy

放大电路对外拾音器输出的微弱电信号进行预放大处理；而后，通过反相电路改变预放大后的电信号的电压极性，使输出信号相位与初始信号相位相差180°。最后，反相后的输出信号通过驱动电路驱使扬声器发出声音与传播至光声池内的环境噪声叠加干涉相消，从而起到降噪作用。测试用光声模块采用非共振光声池，光声信号采集使用电学微音器结合锁相放大器实现。

3.2　光声响应分析

将搭建的包含主动噪声模块的光声光谱气体检测装置放置在蜜胺泡棉声阻单元内，以 C_2H_4/N_2 混合气体作为测试对象，对检测装置进行光声响应测试。分别在安静环境、噪声主频为 100 Hz 和 400 Hz 的噪声环境下开展试验，测试主动噪声控制前后光声响应。图 9 和图 10 所示分别为噪声主频率为 100 Hz 和 400 Hz 的噪声环境下，主动噪声控制的光声光谱气体检测装置对 C_2H_4 的光声响应测试结果。测试过程中，光声光谱气体传感器的采样时间设置为 3.8 s，每次连续采样 40 个点。

利用图 9 和 10 的光声响应分析结果和式(1)，计算得到不同工况下，基于主动噪声控制技术的光声光谱检测装置对 N_2 中痕量 C_2H_4 气体的最低检测限。表 3 总结了不同噪声环境工况下，采用主动噪声控制处理前后，光声光谱气体传感器的背景信号偏差、目标气体检测灵敏度和最低检测限。

由表 3 可知，在 100 Hz 和 400 Hz 两种主频噪声下，采用主动噪声控制技术都能显著增强光声光谱气体检测装置的痕量气体检测能力。且相比于被动噪声控制，主动噪声控制效果更好，检测装置痕量气体检测能力提高了约 3.4 倍。此外，采用主动

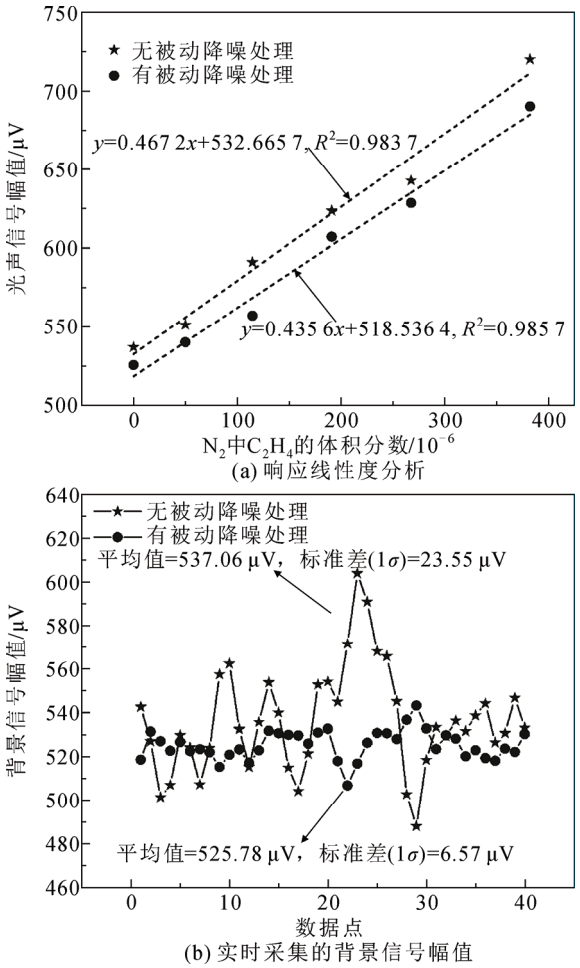


图 9　100 Hz 噪声环境中，主动噪声控制的光声光谱检测装置光声响应分析

Fig.9　Photoacoustic response analysis of active noise cancellation photoacoustic spectroscopy in 100 Hz noisy environment

噪声控制技术后，装置在 100 Hz 和 400 Hz 噪声环境中的检测限分别增大为安静环境的2.3和3.68倍，优于被动噪声控制。

4　结论

1）采用具有 3 维丝状结构的蜜胺泡棉作为光声光谱检测装置的声阻单元，可有效降低噪声干扰，在噪声主频为 100 Hz、400 Hz 的嘈杂环境中，采用被动噪声控制技术处理前后，1 倍信噪比(1σ)下，装置对应的最低检测限分别由 21.2×10^{-6} 和 8.82×10^{-6} 降至 15.2×10^{-6} 和 6.14×10^{-6}，说明在噪声环境中，采用被动噪声控制技术可以提高光声光谱气体传感器的痕量气体检测能力约 1.4 倍。

2）采用基于叠加相干抵消原理的主动降噪控制技术可显著增强光声光谱检测装置的痕量气体检测能力。在噪声主频为 100 Hz、400 Hz 的嘈杂环境

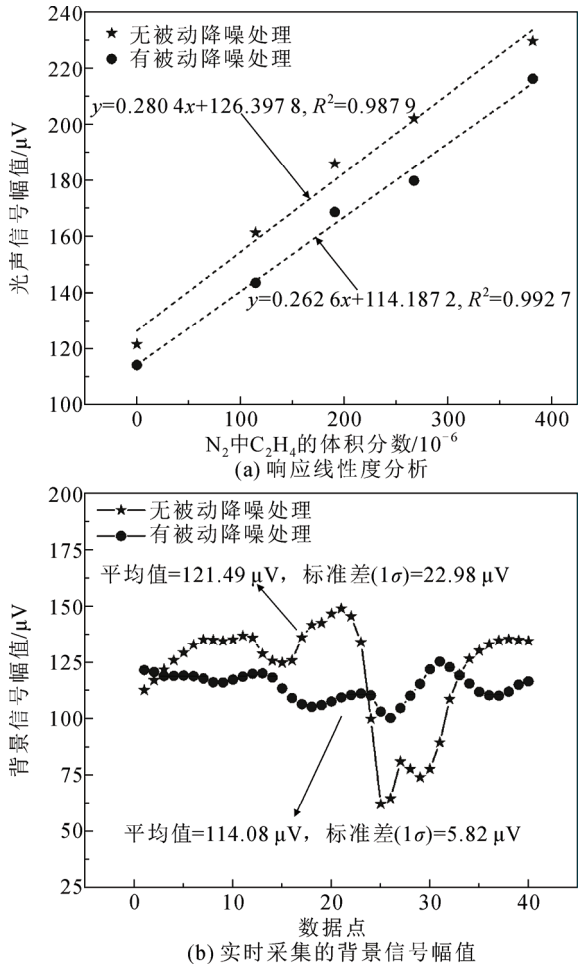


图 10 400 Hz 噪声环境中，主动噪声控制的光声光谱检测装置的光声响应分析

Fig.10 Photoacoustic response analysis of active noise cancellation photoacoustic spectroscopy in 400 Hz noisy environment

中，采用被动噪声控制技术处理前后，1 倍信噪比(1σ)下，装置对应的最低检测限分别由 50.4×10^{-6} 和 82.0×10^{-6} 降至 15.1×10^{-6} 和 24.3×10^{-6}，说明在噪声环境中，采用被动噪声控制技术可以提高光声光谱气体传感器的痕量气体检测能力约 3.4 倍。

3）采用主动噪声控制技术后，同一装置在 100 Hz 和 400 Hz 噪声环境中的检测限分别增大为安静环境下的 2.3 和 3.68 倍，优于被动噪声控制后的 23.4 和 9.4 倍。

表 3 主动噪声控制前后光声光谱检测装置的检测性能

Table 3 Detection performance of photoacoustic spectroscopy before and after active noise cancellation processing

工况		灵敏度 /(μV/10⁻⁶)	背景偏差 /μV	最低检测限 (1σ)/10⁻⁶	最低检测限 (3σ)/10⁻⁶
主动噪声控制前	安静环境	0.452	3.58	7.91	23.7
	100 Hz 噪声环境	0.467	23.6	50.4	151
	400 Hz 噪声环境	0.280	23.0	82.0	246
主动噪声控制后	安静环境	0.446	2.94	6.59	19.8
	100 Hz 噪声环境	0.436	6.57	15.1	45.3
	400 Hz 噪声环境	0.240	5.82	24.3	72.8
控制前/控制后 (100 Hz)			3.33		
控制前/控制后 (400 Hz)			3.37		

参考文献 References

[1] 刘咏飞，马 勇，赵 科，等. 悬臂梁增强型光声光谱：定量测量痕量 CO[J]. 高压电器，2021，57(7)：182-188.
LIU Yongfei, MA Yong, ZHAO Ke, et al. Enhanced photoacoustic spectrum of cantilever beam: quantitative measurement of CO trace quantity[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7): 182-188.

[2] 万留杰，马凤翔，汪胜和，等. SF_6 气体中 H_2S 光声检测及 FFT 滤波在检测信号噪声抑制中的应用[J]. 高电压技术，2021，47(7)：2564-2571.
WAN Liujie, MA Fengxiang, WANG Shenghe, et al. Photoacoustic detection of H_2S in SF_6 and application of FFT filtering in noise suppression of detected signal[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2564-2571.

[3] MA F X, LIAO Z H, ZHAO Y, et al. Detection of trace C_2H_2 in N_2 buffer gas with cantilever-enhanced photoacoustic spectrometer[J]. Optik, 2021, 232: 166525.

[4] 杨天荷，陈伟根，李志军. 基于悬臂梁光纤 F-P 声传感器的光声光谱检测法及其对微量乙炔气体的检测[J]. 高电压技术，2020，46(6)：1922-1928.
YANG Tianhe, CHEN Weigen, LI Zhijun. Detection of trace ethyne by photoacoustic spectroscopy based on fiber-optic cantilever acoustic sensor[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 1922-1928.

[5] 马 勇，肖焓艳，丁 然，等. 基于紫外吸收光谱与最小二乘法的 SO_2、H_2S 与 CS_2 混合气体定量检测[J]. 高压电器，2021，57(3)：157-165.
MA Yong, XIAO Hanyan, DING Ran, et al. Quantitative detection of SO_2, H_2S and CS_2 gas mixture based on UV absorption spectrometry and least squares algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(3): 157-165.

[6] 张 英，张晓星，李军卫，等. 基于光声光谱法的 SF_6 气体分解组分在线监测技术[J]. 高电压技术，2016，42(9)：2995-3002.
ZHANG Ying, ZHANG Xiaoxing, LI Junwei, et al. On-line monitoring technology of SF_6 gas decomposition components based on photoacoustic spectroscopy[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2995-3002.

[7] 程 刚，曹亚南，田 兴，等. 光声池几何形状对光声光谱检测性能的影响. 光谱学与光谱分析. 2020(8)：2345-2351.
CHENG Gang, CAO Yanan, TIAN Xing, et al. Influence of photoacoustic cell geometrical shape on the performance of photoacoustic

spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(8): 2345.

[8] 唐　炬，程宏图，曾福平，等. 基于光声场–光声池耦合度分析的光声池尺寸优化设计研究. 高电压技术，2022，48(8)：2897-2904.
TANG Ju, CHENG Hongtu, ZENG Fuping, et al. Optimal design of photoacoustic cell dimension based on analysis of coupling degree between photoacoustic field and photoacoustic cell[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 2897-2904.

[9] 程　刚，曹　渊，刘　锟，等. 光声光谱检测装置中光声池的数值计算及优化[J]. 物理学报，2019，68(7)：074202.
CHENG Gang, CAO Yuan, LIU Kun, et al. Numerical calculation and optimization of photoacoustic cell for photoacoustic spectrometer[J]. Acta Phys. Sin., 2019, 68(7): 074202

[10] 周　彧，曹　渊，朱公栋，等. 基于 7.6 m 量子级联激光的光声光谱探测 N2O 气体[J]. 物理学报，2018，67(8)：084201.
ZHOU Yu, CAO Yuan, ZHU Gongdong, et al. Detection of nitrous oxide by resonant photoacoustic spectroscopy based on mid infrared quantum cascade laser[J]. Acta Phys. Sin., 2018, 67(8): 084201.

[11] 马欲飞. 基于石英增强光声光谱的气体传感技术研究进展[J]. 物理学报，2021，70(16)：160702.
MA Yufei. Research progress of quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy based gas sensing[J]. Acta Phys. Sin., 2021, 70(16): 160702.

[12] FONSEN J, KOSKINEN V, ROTH K, et al. Dual cantilever enhanced photoacoustic detector with pulsed broadband IR-source[J]. Vibrational Spectroscopy, 2009, 50(2): 214-217.

[13] 毛知新，文劲宇. 变压器油中溶解气体光声光谱检测技术研究[J]. 电工技术学报，2015，30(7)：135-143.
MAO Zhixin, WEN Jinyu. Research on the detection of the dissolved gas in the transformer oil by photoacoustic spectroscopy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 135-143.

[14] CHEN K, LIU S, ZHANG B, et al. Highly sensitive photoacoustic multi-gas analyzer combined with mid-infrared broadband source and near-infrared laser[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 124: 105844.

[15] KUUSELA T, KAUPPINEN J. Photoacoustic gas analysis using interferometric cantilever microphone[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2007, 42(5): 443-474.

[16] BOZÓKI Z, POGÁNY A, SZABÓ G. Photoacoustic instruments for practical applications: present, potentials, and future challenges[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2011, 46(1): 1-37.

[17] SAARINEN M. Cantilever enhanced gas sensing using photoacoustic spectroscopy[D]. Helsinki, Finland: Aalto University, 2010.

[18] 高　扬. 变电站声场特性及噪声分布预测研究[D]. 保定：华北电力大学，2014.
GAO Yang. Study on acoustic field characteristics and noise distribution prediction in substation[D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2014.

[19] KUO S M, MORGAN D R. Active noise control: a tutorial review[J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(6): 943-975.

[20] 田强兵. 分析化学中检出限和测定下限的探讨[J]. 化学分析计量，2007，16(3)：72-73.
TIAN Qiangbing. Discussion on detection limit and determination lower limit in analytical chemistry[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2007, 16(3): 72-73.

[21] KAJIKAWA Y, GAN W S, KUO S M. Recent advances on active noise control: open issues and innovative applications[J]. APSIPA Transactions on Signal and Information Processing, 2012, 1(1): e3.



马凤翔
1988—，男，硕士，高工
主要从事 GIS 故障检测技术，GIS 设备分解气体检测等方面的运维研究工作
E-mail: njumfx@foxmail.com

MA Fengxiang
Senior engineer



李　康(通信作者)
1985—，男，博士，副研究员
主要从事电气设备故障检测、状态监测等方面的研究工作
E-mail: likang07@mail.iee.ac.cn

LI Kang
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2021-10-25　在线出版日期　2022-02-24　　编辑　卫李静