应用光学
Journal of Applied Optics
SCOPUS,等来源期刊
中文核心期刊、中国科技核心期刊

基于光声光谱技术的环保气体GIS设备绝缘状态高灵敏度检测方法

李靖 曾强 张伟平 李元佳 王花蕊 黄志彭

High sensitivity detection method for insulation status of eco-friendly gases GIS equipment based on photoacoustic spectroscopy technology

LI Jing, ZENG Qiang, ZHANG Weiping, LI Yuanjia, WANG Huarui, HUANG Zhipeng

引用本文:
李靖, 曾强, 张伟平, 等. 基于光声光谱技术的环保气体GIS设备绝缘状态高灵敏度检测方法[J]. 应用光学, 2026, 47(2): 395-405. DOI: 10.5768/JAO202647.0203006
LI Jing, ZENG Qiang, ZHANG Weiping, et al. High sensitivity detection method for insulation status of eco-friendly gases GIS equipment based on photoacoustic spectroscopy technology[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(2): 395-405. DOI: 10.5768/JAO202647.0203006

在线阅读 View online: https://doi.org/10.5768/JAO202647.0203006

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于高灵敏度探测器的水下光通信系统

Underwater optical communication system based on high sensitivity detector

应用光学. 2025, 46(4): 929-936 https://doi.org/10.5768/JAO202546.0408001

高灵敏度微位移零差干涉方法

High-sensitivity micro-displacement homodyne interferometry

应用光学. 2022, 43(1): 74-80 https://doi.org/10.5768/JAO202243.0103001

基于少模-无芯-少模光纤结构的高灵敏度折射率传感器

High-sensitivity refractive index sensor based on FMF-CLF-FMF optical fiber structure

应用光学. 2023, 44(2): 462-468 https://doi.org/10.5768/JAO202344.0208002

双飞秒激光频率梳光谱测量技术研究进展

Research progress of double femtosecond laser frequency comb spectroscopy measurement technology

应用光学. 2021, 42(1): 157-175 https://doi.org/10.5768/JAO202142.0107003

大面积三角形探测光幕灵敏度空域分布分析

Spatial distribution of sensitivity of large-area triangular detection light screen

应用光学. 2021, 42(6): 956-962 https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601002

基于微环谐振器的高灵敏度量子传感器

High-sensitivity quantum sensor based on micro-ring resonators

应用光学. 2025, 46(6): 1268-1277 https://doi.org/10.5768/JAO202546.0612008

关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082 (2026) 02-0395-11
引用格式:李靖, 曾强, 张伟平, 等. 基于光声光谱技术的环保气体 GIS 设备绝缘状态高灵敏度检测方法 [J]. 应用光学, 2026, 47(2): 395-405.
LI Jing, ZENG Qiang, ZHANG Weiping, et al. High sensitivity detection method for insulation status of eco-friendly gases GIS equipment based on photoacoustic spectroscopy technology[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(2): 395-405.

在线阅读

基于光声光谱技术的环保气体 GIS 设备绝缘状态高灵敏度检测方法

李 靖[1], 曾 强[1], 张伟平[1], 李元佳[1], 王花蕊[1], 黄志彭[2]

(1. 广东电网有限责任公司 东莞供电局, 广东 东莞 523000; 2. 北京传动联普科技有限公司, 北京 102208)

摘 要:针对气体绝缘开关(gas insulated switchgear, GIS)设备绝缘状态检测中气体压力波动与背景噪声问题,提出基于光声光谱技术的环保气体 GIS 设备绝缘状态高灵敏度检测方法。该方法利用光声光谱技术抑制背景噪声,精准检测环保气体组分;结合最大相关最小冗余准则优选绝缘状态特征,提升检测针对性;通过支持向量机构建模型实现高灵敏度检测。检测流程包括光声信号检测、噪声抑制、组分浓度确定、特征筛选及分类检测。实验显示,C_4/CO_2 混合气体检测中,C_4 组分拟合精度达 0.978,动态响应熵值指数始终保持在 0.1 以下,表明该方法对环保气体 GIS 设备绝缘状态具有优异的检测灵敏度,能够精确捕捉微观分子运动变化,为设备绝缘劣化早期诊断提供可靠依据。

关键词:光声光谱;环保气体;GIS 设备;绝缘状态;高灵敏度;特征优选
中图分类号:TN249; TM315 **文献标志码**:A **DOI**: 10.5768/JAO202647.0203006

High sensitivity detection method for insulation status of eco-friendly gases GIS equipment based on photoacoustic spectroscopy technology

LI Jing[1], ZENG Qiang[1], ZHANG Weiping[1], LI Yuanjia[1], WANG Huarui[1], HUANG Zhipeng[2]

(1. Dongguan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co. , Ltd. , Dongguan 523000, China; 2. Beijing Transmission Union Technology Co., Ltd., Beijing 102208, China)

Abstract: Aiming at the problems of gas pressure fluctuation and background noise in the insulation state detection of gas insulated switchgear (GIS) equipment, a high sensitivity detection method for the insulation state of eco-friendly gases GIS equipment based on photoacoustic spectroscopy technology was proposed. The method used photoacoustic spectroscopy technology to suppress background noise and accurately detect the components of eco-friendly gases. Combined with the maximum correlation minimum redundancy criterion, the insulation state characteristics were optimized to improve the detection pertinence. High sensitivity detection was achieved by building a model with support vector machine. The detection process included photoacoustic signal detection, noise suppression, component concentration determination, feature selection and classification. Experiment results on C_4/CO_2 gas mixtures demonstrated a fitting accuracy of 0.978 for C_4 compoment, and the dynamic response entropy index consistently remaining below 0.1, indicating that the proposed method has excellent detection sensitivity for monitoring the insulation state of eco-friendly gas GIS

收稿日期:2025-07-21; **修回日期**:2025-10-09
基金项目:南方电网公司科技项目(031900KC23070051)
第一作者:李靖, E-mail: suji688501@163.com

equipment, capable of accurately capturing the micro molecular movement changes. This provides a reliable basis for the early diagnosis of equipment insulation deterioration.

Key words: photoacoustic spectroscopy; environmentally friendly gases; GIS equipment; insulation states; high sensitivity; feature selection

引言

气体绝缘开关(gas insulated switchgear, GIS)设备是现代电力系统中不可或缺的关键设备,以其结构紧凑、占地面积小、运行寿命长以及卓越的抗震能力,在电力系统中得到了广泛应用。GIS 设备主要采用六氟化硫(SF_6)气体作为绝缘和灭弧介质,SF_6 因其高绝缘强度和化学稳定性而被广泛使用。然而,SF_6 气体具有极强的温室效应,其全球变暖潜能值(global warming potential, GWP)是二氧化碳的 22 800 倍(按 100 年时间范围计算),对环境造成了严重影响[1]。

在全球气候变化的背景下,减少 SF_6 气体的使用成为降低温室气体排放的重要举措之一。《京都议定书》将 SF_6 列为需要控制的 6 种温室气体之一,要求发达国家在 2008~2012 年间将 SF_6 排放量减少到 1990 年的水平。欧盟等地区也出台了一系列政策,限制 SF_6 在电力设备等领域的使用,并推动寻找环保型替代气体[2]。我国作为全球最大的温室气体排放国之一,也在积极采取措施应对气候变化,鼓励和支持电力行业开展 SF_6 替代气体的研究与应用工作。

近年来,环保气体在 GIS 设备中的应用呈现出快速增长的趋势。研究表明,C_4/CO_2 混合气体等环保气体在绝缘性能、灭弧性能等方面能够满足 GIS 设备的运行要求,同时具有良好的环境友好性。例如,南方电网公司具有自主产权的 126 kV C_4/CO_2 混合环保气体 GIS 在 110 kV 太和站成功应用,标志着我国在环保型 SF_6 替代电力设备研究和应用方面取得了重大技术创新突破[3]。

针对电力系统对 SF_6 电气绝缘设备中气体衍生物的在线高精度探测需要,尹旭坤等提出了差分双通道结构的光声池作为光声探测模块,并使用分布式反馈激光器作为激励光源,搭建了一款工作在高浓度 SF_6 背景气体中的 CO 气体传感器,通过光声共振理论模拟和设计,在纯 SF_6 气体中光声池的品质因子为 84,相对于在氮气载气中的品质因子提高了约 4 倍,经实验验证,差分结构光声池的最大气体流速较单共振腔光声池提高了 6 倍,且具有较强的噪声免疫能力[4]。

在 GIS 设备中,绝缘气体的分解产物与设备绝缘状态密切相关。SF_6 作为常用的绝缘气体,在电弧、局部放电或过热等异常条件下会分解产生多种气体,如 SOF_2、SO_2F_2、SO_2 和 HF 等。这些分解气体不仅具有腐蚀性,会侵蚀绝缘材料和金属部件,降低其机械强度和电气性能,而且其浓度的变化也反映了设备内部的故障程度。例如,当 SO_2 浓度超过一定阈值时,可能表明设备内部存在局部放电或过热问题,进而导致绝缘性能下降。因此,准确监测分解气体的种类和浓度对于评估 GIS 设备的绝缘状态至关重要,有助于及时发现潜在故障,保障设备的安全运行。随着环保气体在 GIS 设备中的应用,开发基于环保气体的 GIS 设备绝缘状态检测方法,对于保障电力系统的安全稳定运行和推动电力行业的可持续发展具有重要意义。目前,针对 GIS 设备绝缘状态检测已有多种方法,各有优劣,具体如表 1 所示。

表 1 不同检测方法的优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of different detection methods

检测方法	优点	缺点
紫外光谱检测[5]	能够快速获取GIS设备内部目标气体的紫外光谱数据,检测速度快;可以较为直观地从光谱图中提取特征信息,如光谱峰的位置、强度、形状等,便于对绝缘状态进行初步分析。	受环境因素(如温度、湿度、电磁干扰等)影响较大,可能导致检测结果的准确性和可靠性降低;对于一些复杂的绝缘状态故障,仅依靠紫外光谱特征信息难以进行准确判断。
基于神经网络的检测[6]	具有较强的学习和自适应能力,能够处理复杂的非线性关系,对GIS设备绝缘状态的检测具有较高的准确性;可以通过大量的训练数据不断优化模型性能,提高检测精度。	需要大量的训练数据,数据不足或质量不高可能导致模型性能下降;模型训练过程复杂,计算量大,对硬件设备要求较高;模型的可解释性较差,难以直观地理解模型的决策过程。
基于温度的检测[7]	实现简单,成本较低,易于在现有设备上进行改造和应用;可以实时监测GIS设备的关键部位温度变化,及时发现设备运行中的异常情况。	只能反映GIS设备的热状态,无法直接检测绝缘材料的性能变化;对于一些不伴随明显温度变化的绝缘故障,难以进行准确检测。
脉冲电流法检测[8]	对局部放电现象具有一定的灵敏度,能够检测到GIS设备内部的微小放电现象,从而对绝缘状态进行评估;检测原理相对简单,技术成熟度较高。	可能受到多种因素(如噪声、电磁干扰等)的干扰,影响检测的准确性;对于一些非局部放电引起的绝缘故障,检测效果不佳。

光声光谱技术作为一种基于光声效应的分析方法，具有独特的优势和潜力。光声效应是指当特定波长的光照射到物质表面时，物质吸收光能并转化为热能，从而产生声波。这些声波的频率和强度与物质的种类和浓度直接相关[9]。通过测量这些声波，可以准确地识别和量化气体混合物中的各个成分。光声光谱技术正是利用这一原理，通过测量气体样本在光照射下产生的声波，实现对气体成分及其浓度的精确检测。

本研究提出了一种基于光声光谱技术的环保气体 GIS 设备绝缘状态高灵敏度检测方法。光声光谱技术在气体检测中虽已较为成熟，但将其应用于高压力、强电磁干扰的 GIS 环保气体绝缘状态监测仍面临信号微弱、噪声复杂、压力波动显著等挑战。本文在以下方面实现了方法集成与场景应用的创新：1）提出了“非共振型光声池+固定频率调制+复合噪声抑制”的检测结构，显著提升了在强 SF_6 背景气体中的信噪比与稳定性；2）将最大相关最小冗余准则与支持向量机（support vector machine, SVM）相结合，构建了面向绝缘状态评估的特征优选-分类耦合模型，提升了状态识别的可解释性与准确率；3）在 C_4/CO_2 混合环保气体 GIS 设备中系统验证了方法的检测限、重复性、动态响应等关键性能，为光声光谱技术在电力设备智能监测中的推广应用提供了实证基础。实验结果表明，该方法对环保气体 GIS 设备绝缘状态具有优异的检测灵敏度，能够精确捕捉微观分子运动变化，为设备绝缘劣化早期诊断提供可靠依据。

1　环保气体 GIS 设备绝缘状态高灵敏度检测方法

1.1　基于光声光谱技术的环保气体检测

在 GIS 设备的绝缘状态检测中，光声光谱技术通过以下步骤实现对环保气体的高灵敏度检测。首先，优化设计圆柱形光声池，选择合适的材料以确保热导率和机械强度，从而增强光声信号。光照射气体产生声波，其频率和强度与气体种类及浓度相关，通过测量声波即可识别气体成分。声波转换为电信号后，经锁相放大器放大和滤波提高信噪比，再由信号处理系统进行采样和模数转换。通过分析光声信号确定气体浓度，这些信息即作为 GIS 绝缘状态的特征。为提高检测准确性，采用窄带激光源和声学屏障等技术抑制噪声。最终，利用 SVM 对筛选出的特征进行分类，以确定 GIS 的绝缘状态。该技术不仅提高了检测灵敏度，还能为设备绝缘劣化的早期诊断提供可靠依据。

GIS 设备是一种高压电气设备，其内部充满了高压环保型气体，这些气体具有良好的绝缘性能和灭弧性能[10]。因此通过监测 GIS 设备内的环保气体，即可实现对其绝缘状态的检测。

光声光谱检测方法具有显著的高灵敏度特性，主要体现在两个方面：首先，检测过程中光声信号是由待测气体吸收周期性调制的激励光后产生，这种光声信号与物质吸收光能的大小直接相关，因此可用于检测各种试样，这种检测方式使得光声光谱技术能够在很宽的光学和电磁学波长范围内进行研究，而不必改变检测系统；其次，光声光谱技术是一种间接的光谱检测技术，它利用物质吸收光能后产生的光声信号进行分析，因此具有无背景噪声的特点，这使得光声光谱技术在检测微弱信号时具有更高的信噪比和灵敏度。

将光声光谱检测方法应用于环保气体 GIS 设备绝缘状态检测过程中，基于光声效应获取检测结果。光声效应是指 GIS 设备内的环保气体吸收周期性的光能后，产生的周期性无辐射热效应过程，在宏观上表现为气体压力的周期性波动[11]。图 1 所示为基于光声光谱技术的环保气体 GIS 设备绝缘状态检测的过程。

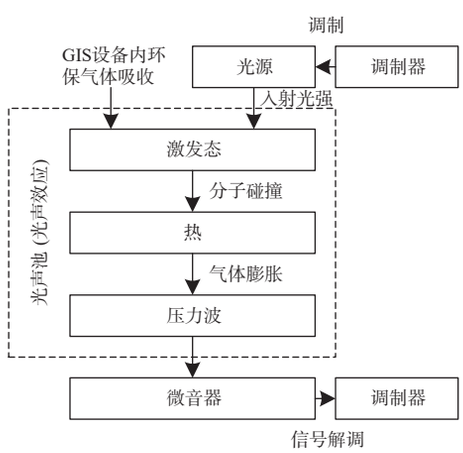


图 1　基于光声光谱技术的环保气体组分检测过程

Fig. 1　Detection process of environmentally friendly gas components based on photoacoustic spectroscopy technology

在光声光谱技术中，光声池的设计对于检测的灵敏度和准确性至关重要。其设计选择主要基于

以下几个关键因素：

1）材料的选择。所选材料应具备良好的热导率和适当的机械强度，以减少热损失并确保结构的稳定性，同时与待测气体兼容，避免发生化学反应。

2）光声池的形状和尺寸。不同的形状和尺寸会影响声波的共振频率和光声信号的强度，光声池通常选择圆柱形设计，其长度和直径需根据所需检测气体的共振模式进行优化。

3）光声池的共振频率应与待测气体的光声信号频率相匹配，以增强信号强度，可以通过调整光声池的有效长度来实现。共振频率f计算公式为

$$f=\frac{v}{2L} \tag{1}$$

式中：v为声速，m/s；L为光声池的有效长度，m。

4）光声池的声学特性，如声波的衰减和共振模式，需要优化以提高检测灵敏度，而光学特性，如透光率和反射率，也应考虑在内，以确保光能最大程度转换为热能。

5）品质因数Q是衡量光声池能量损耗的重要参数，高Q值意味着低能量损耗和高的信号增强能力。因此，在选择光声池时，应优先考虑具有高Q值的设计。

品质因数Q可以通过光声池的共振频率f和带宽Δf来计算：

$$Q=\frac{f}{\Delta f} \tag{2}$$

带宽Δf可以通过测量光声池在不同频率下的响应特性来确定。

6）光声池的体积和热阻尼时间影响光声信号的形成和检测精度，也是设计时需要考虑的因素。综合这些因素，可以设计出适应特定检测需求的高效光声池。

光声信号的形成可理解为是包含光、热、声结合的，具有复杂特征的能量转换过程[12]。S为GIS设备内环保气体分子受无辐射热效应所形成的热功率密度，即单位体积内气体吸收光能并转化为热能的速率，其表达式为

$$S=N\sigma\delta=\alpha\delta \tag{3}$$

式中：N为分子数密度，$\mathrm{m^{-3}}$，表示单位体积内的气体分子数；δ为入射光强，$\mathrm{W/m^2}$；σ为GIS设备内环保气体分子的吸收截面，$\mathrm{m^2}$；α为GIS设备内环保气体分子的吸收系数，表示气体分子对光的吸收能力，$\mathrm{m^{-1}}$。

针对一个半径和长度分别为e和L的圆柱形光声柱，以A_0表示其在非共振环境下位移的非零模式振幅：

$$A_0(\beta)=\frac{\delta\alpha(\gamma-1)\int\delta(r,\beta)\mathrm{d}v_{\mathrm{R}}}{V_{\mathrm{c}}\beta\left[1+\dfrac{\delta}{\beta\tau_0}\right]} \tag{4}$$

式中：β为光调制频率，Hz；γ为GIS设备内环保气体的热容比；r为光声池质量因数；v_{R}为环保气体在谐振腔内的声速，m/s；V_{c}为光声池体积，$\mathrm{m^3}$；τ_0为热阻尼时间，s。τ_0的计算公式为

$$\tau_0\approx\frac{\rho c_p e^2}{2.5\kappa} \tag{5}$$

式中：ρ为环保气体密度，$\mathrm{kg/m^3}$；c_p为环保气体定压比热容，J/(kg·K)；e为光声池半径；κ为热传导系数，W/(m·K)。

若P_0为射至光声池的整体光功率，则可通过式(6)替代式(4)：

$$A_0(\beta)=\frac{\delta\alpha(\gamma-1)P_0}{\beta\left[1+\dfrac{\delta}{\beta\tau_0}\right]\pi e^2} \tag{6}$$

以$U(\beta)$表示GIS设备内环保气体的振幅A_0在通过微音器后形成的光声信号，其强度可通过环保气体体积分数a的函数表示，光声信号公式为

$$U(\beta)=\frac{\delta(\gamma-1)}{\beta\left[1+\dfrac{\delta}{\beta\tau_0}\right]\pi e^2}M_{\mathrm{t}}P_0\alpha a \tag{7}$$

式中：M_{t}为微音器信号转换能力，V/m。光声池常数C_{cell}可通过$[\delta(\gamma-1)]/\{\beta[1+(\delta/\beta\tau_0)]\pi e^2\}$描述。

通过该公式能够确定光声光谱定量分析过程中单一组分气体在最优状态下所得的光声信号值。但实际利用光声光谱技术进行环保气体GIS设备绝缘状态检测过程中，U内不仅包含被测环保气体产生信号U_{d}，还包含背景气体形成的光声信号U_{b}与光声光谱检测结构产生的噪声信号U_{n}，以M_{t}为微音器的信号转换能力，由此可得：

$$U=U_{\mathrm{d}}+U_{\mathrm{b}}+U_{\mathrm{n}}=C_{\mathrm{cell}}P_{\mathrm{M}}\vartheta_{\mathrm{d}}\alpha_{\mathrm{d}}+C_{\mathrm{cell}}M_{\mathrm{t}}\vartheta_{\mathrm{b}}\alpha_{\mathrm{b}}+U_{\mathrm{n}} \tag{8}$$

式中：ϑ_{d}和α_{d}分别为GIS设备内环保气体浓度和其在指定波长区域的吸收系数；ϑ_{b}和α_{b}分别为背景气体浓度和其在指定波长区域的吸收系数。

采用窄带激光源选择吸收峰方法，避开背景气体干扰波长，实现U_{b}信号抑制；采用声学屏障隔离与锁相放大技术方法，滤除环境振动噪声，实现U_{n}信号抑制。结合差分测量与自适应滤波算法处

理, 能够降低或消除光声信号内的噪声影响, 提升检测精度。

为评估所采用的噪声抑制方法(窄带激光源、声学屏障与锁相放大技术)的实际效果, 进行了对比测试。设置无噪声抑制、仅窄带激光源、仅锁相放大、窄带激光源+锁相放大(完整方案)4 组测试工况, 通过噪声抑制前后信号的强度、干扰信号占比及信噪比变化, 验证窄带激光源和锁相放大技术的实际效果, 测试结果如表 2 所示。

表 2　噪声抑制效果定量测试结果

Table 2　Quantitative test results of noise suppression performance

测试工况	目标信号强度/μV	干扰信号强度/μV	信噪比/dB
无噪声抑制	125.6±4.2	48.3±3.1	8.2±0.5
仅窄带激光源	124.8±3.9	25.7±2.4	13.7±0.4
仅锁相放大	126.1±4.0	15.2±1.8	18.4±0.3
窄带激光源+锁相放大	125.3±3.8	5.1±0.9	33.8±0.6

实验结果显示, 仅启用窄带激光源时, 可避开高频电磁噪声频段, 减少背景气体非目标波长吸收, 从而降低干扰信号强度、提升信噪比; 仅启用锁相放大技术时, 能提取目标频率信号, 过滤机械振动噪声与工频干扰, 进一步削弱干扰信号、提高信噪比; 两者结合使用时, 可通过分别抑制背景气体干扰信号与结构噪声实现协同作用, 大幅降低干扰信号强度并稳定提升信噪比, 验证了噪声抑制方法的有效性, 为后续气体浓度计算与 GIS 设备绝缘状态评估提供精准数据支持。

在 GIS 设备运行过程中, 气体压力波动会对光声信号产生影响。为了定量分析气体压力波动与检测误差之间的关系, 建立如下模型:

$$U = U_0\left(1+\mu\frac{\Delta p}{p_0}\right) \tag{9}$$

式中: U为实际测量的光声信号强度, V; U_0为无压力波动时的光声信号强度, V; μ为压力敏感系数, 表示气体压力变化对光声信号的影响程度; Δp为气体压力变化量; p_0为初始气体压力。

通过测量不同压力波动下的光声信号确定压力敏感系数μ, 进而分析气体压力波动对检测结果的影响程度。当气体压力波动在一定范围内时, 压力敏感系数μ为一常数。当气体压力波动超出该范围时, 光声信号的变化趋势将变得复杂, 需要进一步研究其非线性关系。

光声光谱技术在原理上对气体压力波动具有一定的抑制作用。光声效应产生的声波频率和强度主要与气体吸收光能的大小直接相关, 而气体吸收光能的特性相对稳定, 受气体压力波动的影响较小。光声信号的产生过程包括以下几个步骤:

1) 光吸收。气体分子吸收特定波长的光能, 转化为热能。这一过程主要取决于气体分子的吸收特性, 与气体压力的直接关系较小。

2) 热膨胀。气体分子吸收热能后发生热膨胀, 产生压力波动。虽然气体压力的变化会影响热膨胀的程度, 但由于光声信号的检测是在短时间内完成的, 气体压力的波动对热膨胀的影响相对有限。

3) 声波产生。热膨胀产生的压力波动进一步转化为声波。光声池的设计可以有效隔离外部气体压力波动对声波产生的干扰。采用密封光声池结构, 可以减少外部气体压力波动对内部声场的影响; 同时, 通过优化光声池的几何形状和材料特性, 可以进一步降低气体压力波动对声波传播的影响。

此外, 采用的信号处理算法也能进一步降低气体压力波动带来的干扰。利用自适应滤波算法, 实时调整滤波参数, 抑制由气体压力波动引起的噪声成分, 从而提高检测的稳定性和准确性。

通过上述过程即可实时获取 GIS 设备运行过程中环保气体的光声信号, 进而确定 GIS 设备内环保气体中各组分的浓度。

1.2　绝缘状态特征优选

将光声光谱技术检测得到的环保气体组分信息作为 GIS 设备绝缘状态特征, 构建绝缘状态特征原始集。应用最大相关最小冗余准则对状态特征进行优选[13], 以提取最能反映 GIS 设备绝缘状态特征的环保气体各组分浓度。

互信息是最大相关最小冗余准则中变量相关性分析的标准[14], 以G_x和G_y分别表示两个任意环保气体组分信息变量, $q(G_x)$、$q(G_y)$和$q(G_x,G_y)$分别表示两者的概率密度与联合概率密度, 由此可通过式(10)描述两者间的互信息:

$$I(G_x,G_y)=\iint q(G_x,G_y)\lg\frac{q(G_x,G_y)}{q(G_x)q(G_y)}\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{10}$$

最大相关原则要求所选 GIS 设备绝缘状态特征集与状态目标类之间存在显著相关性, 公式为

$$\max D(T,h), D=\frac{1}{|T|}\sum_{F_i\in T} I(F_i,h) \tag{11}$$

式中：T和$|T|$分别表示 GIS 设备绝缘状态特征子集和特征量数量；F_i和h分别表示第 i 个 GIS 设备绝缘状态特征和状态目标类别。

最小冗余准则要求通过 GIS 设备绝缘状态特征间互信息最小化，令所选特征集内不同特征间的相关性最小，公式为

$$\min R(T), R = \frac{1}{|T|^2}\sum_{F_i,F_j\in T} I(F_i,F_j) \tag{12}$$

利用最大相关最小冗余准则选取 GIS 设备绝缘状态特征的过程为：

1）针对初始的 GIS 设备绝缘状态特征气体组分信息，构建初始状态特征全集F，同时确定绝缘状态气体组分信息对应的状态类型 Z。

2）以 n 表示最优的 GIS 设备绝缘状态特征集合数量，其值小于F内绝缘状态特征总数 m。

3）确定F内全部绝缘状态特征量的互信息$I(F,Z)$，利用互信息最大的F_{U_x}令最优特征集为$T=\{F_{U_x}\}$，由此将需计算的 GIS 设备绝缘状态特征集转换成$F=F-T$。

4）搜索F内全部特征量，分别确定符合信息熵和信息差的 GIS 设备绝缘状态特征F_{U_x}，在此条件下最优特征集转换成$T=T\cup\{F_{U_x}\}$。

5）通过上述过程确定的最优特征集内的 GIS 设备绝缘状态特征数量等于 n 时，终止搜索，基于所得顺序，逐一输入信息熵和信息差下的最优特征集；若小于 n，那么进行过程 3），直至最优特征集内的 GIS 设备绝缘状态特征数量等于 n 为止。

1.3 基于支持向量机的检测模型

使用 SVM 对优选后的 GIS 设备绝缘状态特征进行分类和检测[15]，以确定 GIS 设备的绝缘状态。将数据集一分为二，一部分用于训练，剩余用于测试。以$\{(F_i,y_i),i=1,2,\cdots,l\}$表示 GIS 设备绝缘状态特征训练集，其中$F_i$和$y_i$分别表示检测模型输入（即 GIS 设备绝缘状态特征）和输出（即 GIS 设备绝缘状态识别结果）。

以$\Phi(\cdot)$表示非线性映射，利用其可将F_i映射至高维特征空间内，并生成线性回归函数，由此导出初始 GIS 设备绝缘状态特征空间内的非线性回归函数，获取 GIS 设备绝缘状态特征分类问题的决策函数：

$$\phi(F)=w\cdot\Phi(F)+b \tag{13}$$

式中，w和b分别为权值和偏置。

经由对$\{(F_i,y_i),i=1,2,\cdots,l\}$的持续学习可获取检测模型相关参数，由此基于函数$\phi(F)$确定任意输入所对应的输出值，也就是环保气体 GIS 设备绝缘状态的检测结果。

为提升检测结果的准确性，将拉格朗日函数引入 SVM 最优化问题[16]，由此构建 SVM 检测模型：

$$\phi(F)=\sum_{i=1}^{l}(\eta_i-\eta_i^*)\exp\left(-\lambda\|F-F_i\|^2\right)+b \tag{14}$$

式中：η_i和η_i^*均为拉格朗日乘子；λ为径向基核函数宽度参数。

2 测试实验

2.1 实验环境

为验证本文基于光声光谱技术的环保气体 GIS 设备绝缘状态高灵敏度检测方法的实际应用性能，以某型号环保气体 GIS 设备为研究对象（如图 2 所示），研究对象采用 C_4/CO_2 混合气体作为环保气体。搭建光声光谱实验平台用于采集研究对象环保气体组分信息，光声光谱实验平台如图 3 所示。实验平台的拓扑结构图如图 4 所示。



图 2 研究对象

Fig. 2 Research object

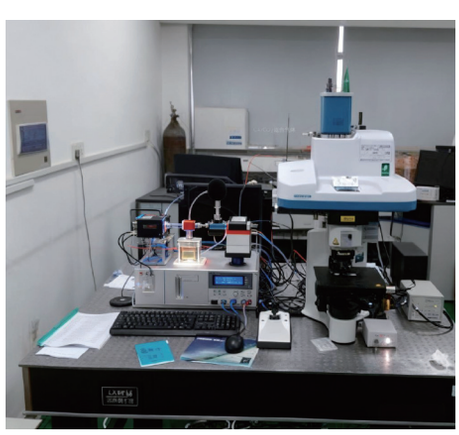


图 3 光声光谱实验平台

Fig. 3 Photoacoustic spectroscopy experimental platform

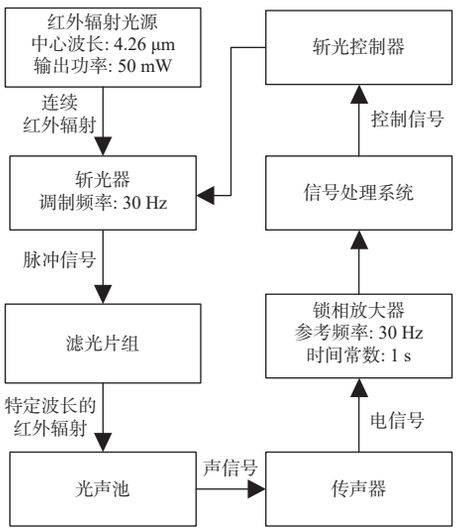


图 4　实验平台的拓扑结构

Fig. 4　Topology of experimental platform

实验平台采用红外热辐射光源作为激发源, 其输出功率为 50 mW, 中心波长为 4.26 μm。系统采用的激光器中心波长为 4.26 μm, 与上述红外热辐射光源的中心波长及目标气体的吸收峰相匹配。激光器的波长调谐范围为 4.25 μm~4.27 μm。为抑制杂散光干扰, 选用了中心波长为 4.26 μm、带宽为 150 nm 的滤光片, 该参数与激光器的输出光谱相匹配, 旨在最大限度地透过目标波长信号并抑制带外辐射, 从而保障后续光声信号检测的准确性。

光源通过机械斩波器进行调制, 调制频率固定为 30 Hz, 调制深度达到 90% 以上。光声池采用圆柱形谐振腔设计, 腔体长度为 15 cm, 内径为 6 mm, 品质因数为 120。气体样品在标准大气压下以 500 mL/min 的流速通过光声池, 实验环境温度控制在 25 ℃±0.5 ℃, 湿度保持在 40%±5% 范围内。

信号采集系统采用驻极体电容式传声器, 灵敏度为 50 mV/Pa, 频率响应范围为 20 Hz~20 kHz。锁相放大器设置时间常数为 1 s, 参考信号相位调节精度为 0.1°, 动态储备为 80 dB。信号处理系统采样率为 1 kHz, 模数转换精度为 24 位。实验使用 C_4/CO_2 混合气体作为测试介质, 其中 C_4 体积分数为 20%, CO_2 体积分数为 80%。系统检测限达到 0.1 μL/L, 相对标准偏差小于 2%。

实验平台采用红外热辐射光源, 通过机械调制方法实现光源频率调制, 本实验采用非共振型光声池, 并基于 30 Hz 的固定调制频率获取相对较高的光声信号。光声信号经由驻极体电容式传声器进入锁相放大器, 再传输至信号处理系统, 实现对研究对象气体组分的检测。

为了全面了解背景噪声的特性, 使用频谱分析仪对实验环境中的背景噪声进行了测试。测试结果显示, 背景噪声主要集中在低频段(<100 Hz), 主要来源于机械振动和电磁干扰。其中, 机械振动噪声的频率范围为 10 Hz~50 Hz, 电磁干扰噪声的频率范围为 50 Hz~100 Hz。

图 5 为背景噪声的频谱图。从图中可以看出, 机械振动噪声主要集中在 10 Hz~50 Hz 频段, 其强度随频率升高逐渐降低; 电磁干扰噪声主要集中在 50 Hz~100 Hz 频段, 呈现出明显的峰值, 这可能是由实验环境中 50 Hz 交流电源及其谐波干扰所致。

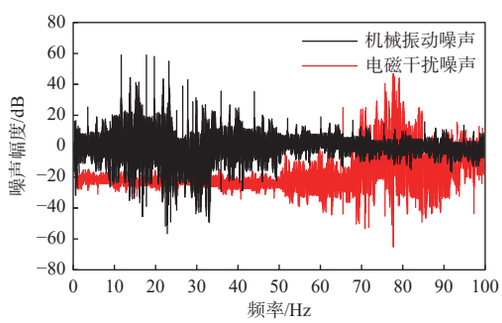


图 5　背景噪声频谱图

Fig. 5　Background noise spectrogram

2.2　光声光谱技术测试

本研究采用非共振光声池, 并在固定的 30 Hz 调制频率下进行所有测量。实验平台内光声池的声速提高时, 其共振频率也随之提升, 使用 COMSOL 仿真软件计算了 C_4 及 CO_2 气体的理论共振频率, 结果如图 6 所示。

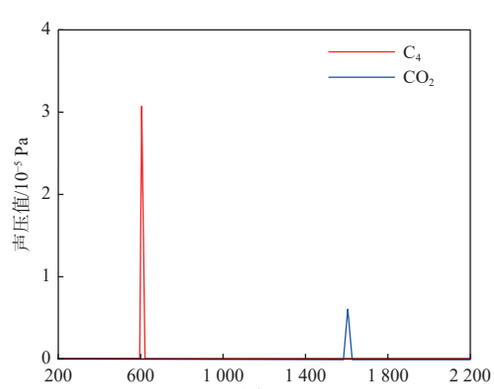


图 6　C_4/CO_2 的光声池响应

Fig. 6　Response of photoacoustic cell to C_4/CO_2

由图 6 可知, 在相应条件下, C_4 气体的归一化共振频率为 612 Hz, 而 CO_2 气体的共振频率为

1639 Hz, C_4 气体的共振频率比 CO_2 气体低 1 027 Hz。这一结果表明，不同气体在光声池中的响应特性存在显著差异，为后续的气体成分检测提供了理论依据。

基于光声池响应获取不同环保气体的光声信号后，以 C_4 组分为例，将气体组分的体积分数与光声信号响应分别作为横、纵坐标，生成一元校正曲线，该曲线斜率即为 C_4 气体组分灵敏度。结果如图 7 所示。

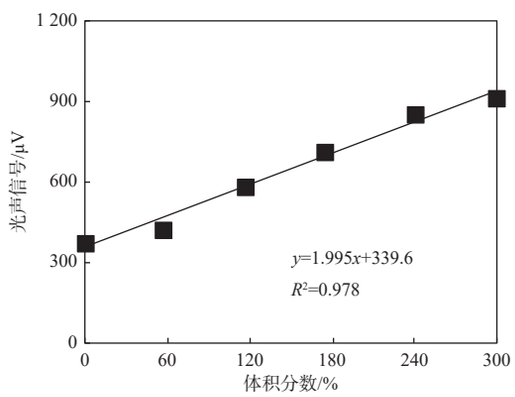


图 7 C_4 气体的一元校正曲线

Fig. 7 Univariate calibration curve for C_4

由图 7 可知，C_4 气体组分数据拟合精度 R^2 达到 0.978，斜率达到 1.995 μV/%，这一高拟合精度和斜率表明，本文提出的光声光谱检测方法在检测 C_4 气体组分时具有较高的灵敏度，能够准确地反映气体浓度的变化。

为验证实验结果的可靠性，对每组气体（C_4/CO_2）进行 5 次的独立重复测试，每次测试前需执行完整的系统重启和气路冲洗流程以确保实验条件的一致性。结果如表 3 所示。

表 3 重复测试结果

Table 3 Repeated test results

测试批次	C_4共振频率/Hz	CO_2共振频率/Hz
1	612.0±3.2	1639.0±5.1
2	609.4±2.8	1641.2±4.7
3	610.7±3.1	1637.5±5.3
4	611.3±2.9	1640.8±4.9
5	608.9±3.0	1638.3±5.0

表 3 的重复测试数据表明，C_4 气体共振频率均值为 610.1±1.3 Hz，CO_2 气体共振频率均值为 1639.4±1.5 Hz，两组数据的标准偏差均控制在 5.3 Hz 以内。C_4 气体 5 次测量结果的相对标准偏差为 0.5%，CO_2 气体为 0.3%，显示出良好的测量重复性。两组气体的共振频率差异稳定在 1029.3 Hz，与理论值相符。测试数据波动范围符合仪器精度指标，未出现异常离群值，证明实验系统具有较高的稳定性和可靠性。

2.3 特征优选

C_4/CO_2 环保气体绝缘故障条件下，C_4的分解产物和 CO_2 分解或反应产物包括，CF_4、COF_2、CO、C、O_2，将其作为标准绝缘特征气体，基于三比值法的构建原则，生成不同类型的可能绝缘特征比值，如表 4 所示。

表 4 绝缘特征比值

Table 4 Insulation feature ratio

编号	特征量	编号	特征量
1	CF_4/COF_2	6	COF_2/C
2	CF_4/CO	7	COF_2/O_2
3	CF_4/C	8	CO/C
4	CF_4/O_2	9	CO/O_2
5	COF_2/CO	10	C/O_2

将研究对象的初始绝缘特征数据处理为 10 维特征比值量，以 352×10 的矩阵数据构建绝缘特征集，作为最大相关最小冗余算法的输入，同时将绝缘特征数据对应的绝缘类型（T1、T2、T3、T4、T5）生成标签向量矩阵。设定最优特征集的数量为 10，利用信息熵与信息差搜索规则获取初始特征集内全部绝缘特征量的优劣排序，结果如表 5 所示。其中，原始编号为表 4 内编号 1~10 的绝缘故障特征量排序。

分析表 5 可得，两种不同搜索要求下的绝缘特征量优劣排序基本一致，同时最优绝缘特征量排序内前几个特征量均包含 1、10、7，即三比值法确定的 3 个绝缘特征比值量 CF_4/COF_2、C/O_2、COF_2/O_2，该结果说明本文方法优选后的绝缘特征结果与三比值法的故障特征比值一致，即本文方法的特征优选结果能够达到获取更优质的绝缘特征的目的。

表 5 绝缘特征优选结果

Table 5 Insulation feature optimization results

排序准则	特征量编号排序
原始编号	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
信息熵	1, 10, 2, 7, 3, 6, 9, 5, 8, 4
信息差	1, 2, 10, 7, 6, 3, 9, 5, 8, 4

2.4 信号基线漂移率

基线漂移直接影响气体浓度定量分析的准确

性, 长期监测中微小的漂移会导致累积误差, 掩盖真实的气体分解信号。通过评估漂移率可验证系统稳定性, 识别环境温度波动、光源强度变化或机械振动等干扰因素对测量的影响。抑制漂移率能提升检测下限, 确保微量分解产物的可靠识别, 为绝缘劣化早期预警提供数据支撑。信号基线漂移率结果如表 6 所示。

表 6　信号基线漂移率结果

Table 6　Baseline drift rate of signal

特征编号	信号基线漂移率/%
1	0.23
2	0.15
3	0.37
4	0.29
5	0.12
6	0.41
7	0.08
8	0.33
9	0.26
10	0.19

所测信号基线漂移率均值为 0.243%, 所有数据点均低于 0.5% 的工业级阈值, 且 7 号样本低至 0.08%, 表明系统具有优异的长期稳定性。数据离散程度可控, 漂移率波动范围集中在 0.1%～0.4% 区间, 说明该方法对环境干扰抑制效果显著。低漂移特性有效保障了微量气体分解产物的定量精度, 满足 GIS 设备绝缘状态早期劣化监测对数据可靠性的严苛需求, 为光声光谱技术在高灵敏度检测场景的应用提供了实证支撑。

2.5　信噪比

高灵敏度检测易受环境噪声、设备本底信号及气体浓度波动干扰, 而信噪比能直接反映系统区分目标信号与噪声的能力。通过定量评估信噪比, 可评估系统在低浓度气体下的有效检出限, 并指导光源调制频率、传感器参数及信号处理算法的优化, 避免误判或漏检。抑制前后的信噪比结果如表 7 所示。

表 7 数据表明, 噪声抑制技术使信噪比显著提升至 33.65 dB~34.56 dB 区间, 较抑制前的 16.21 dB~21.89 dB 实现跨越式改进。5 次测试中抑制后信噪比波动范围仅 0.91 dB, 系统稳定性优异。抑制前后信噪比差值达 15.44 dB~17.35 dB, 证明本文方法能有效消除环境干扰, 在复杂工况下保持稳定检测性能。

表 7　信噪比结果

Table 7　Results of signal to noise ratio

测试次数	信噪比/dB	
	抑制前	抑制后
1	18.76	34.12
2	16.21	33.87
3	21.89	34.56
4	17.43	33.65
5	20.98	34.01

2.6　绝缘状态检测结果

采用本文方法在不同时间节点对研究对象绝缘状态进行检测, 所得结果如图 8 所示。

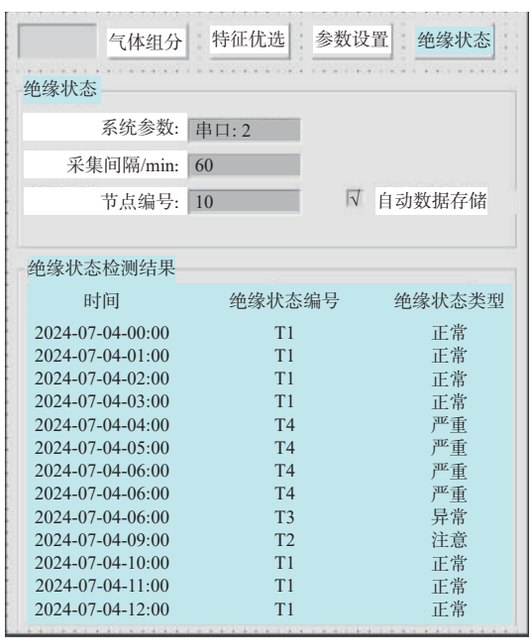


图 8　绝缘状态检测结果

Fig. 8　Insulation condition detection results

检测结果如图 8 所示。从图中可以看出, 本文方法能够清晰地识别出 GIS 设备在不同运行阶段的绝缘状态变化。在设备运行初期, 绝缘状态良好, 检测结果显示各绝缘状态处于正常范围内; 随着运行时间的增加, 部分绝缘状态开始出现变化, 设备绝缘状态逐渐下降; 在设备运行后期, 绝缘重新恢复正常, 检测结果能够准确地反映出设备绝缘状态的劣化趋势。

2.7　动态响应熵值指数

动态响应熵值指数测试能精确量化环保气体 GIS 设备的微观分子运动变化, 灵敏捕捉局部放电和绝缘劣化的早期特征, 为新型气体设备提供关键状态评估依据。为了充分测试本文方法的性

能，将其与紫外光谱检测方法、基于神经网络的检测方法进行对比测试。三种方法的动态响应熵值指数结果如图 9 所示。

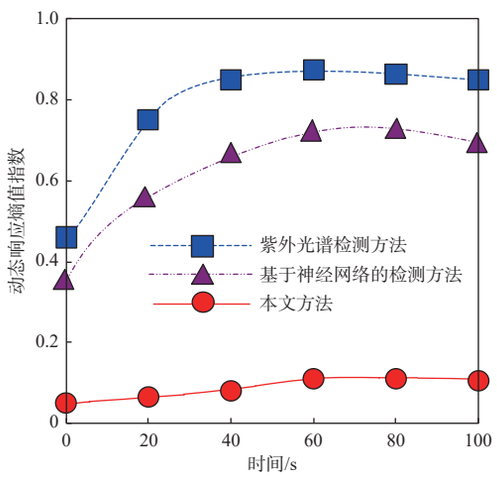


图 9 动态响应熵值指数对比

Fig. 9 Comparison of dynamic response entropy indexes

从图中数据来看，本文方法的动态响应熵值指数始终维持在极低水平，0~100 s 内均低于 0.1，最低趋近于 0，说明该方法在检测环保气体 GIS 设备绝缘状态时，能精准捕捉微观分子运动，并具有高度稳定性。相比之下，紫外光谱检测方法的动态响应熵值指数在 0 s 时约为 0.5，20 s 时升至 0.8，之后稳定在 0.8~0.9 之间；基于神经网络的检测方法在 0 s 时约为 0.4，20 s 时升至 0.6，最终稳定在 0.7~0.8 之间。这凸显了本文方法的优势：在检测环保气体 GIS 设备绝缘状态时，能更灵敏、准确地反映微观分子运动变化，更有效地捕捉局部放电和绝缘劣化早期特征，为新型气体设备提供更可靠的状态评估依据；同时在实时监测绝缘性能稳定性方面优势显著，能提前预警潜在风险，保障设备安全运行。

3 结论

本文提出的基于光声光谱技术的环保气体 GIS 设备绝缘状态高灵敏度检测方法，通过“非共振光声池+固定频率调制+复合抑噪”的系统设计，基于最大相关最小冗余准则的绝缘特征优选机制，以及 SVM 分类模型的场景适配性优化，在技术组合与系统集成层面实现了创新，实现了对绝缘状态的精准评估。该方法利用光声光谱技术有效抑制背景噪声，结合最大相关最小冗余准则筛选出最具代表性的绝缘状态特征，显著提升了检测的针对性与效率。结果显示，在 C_4/CO_2 混合环保气体检测中，C_4 气体组分数据拟合精度高达 0.978，斜率达到 1.995 μV/Hz，且动态响应熵值指数稳定维持在 0.1 以下。这些指标证明了该方法的高灵敏度和稳定性。然而，研究仍存在局限性，如当前模型主要针对特定气体混合物，未来需进一步验证其普适性。尽管如此，该研究为 GIS 设备绝缘劣化的早期诊断提供了可靠的技术支撑。

参考文献：

[1] 王欣欣, 何成, 陈军, 等. 高寒环境对 GIS 设备用 EPDM 橡胶密封圈的影响研究[J]. 绝缘材料, 2024, 57(2): 86-91.
WANG Xinxin, HE Cheng, CHEN Jun, et al. Study on influence of alpine environment on EPDM rubber seal ring for GIS equipment[J]. Insulating Materials, 2024, 57(2): 86-91.

[2] 靳梦磊, 夏亚龙, 肖淞, 等. 环保绝缘气体设备研发与应用进展[J]. 四川电力技术, 2023, 46(4): 12-16.
JIN Menglei, XIA Yalong, XIAO Song, et al. Research and application progress of environmentally friendly insulating gases[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2023, 46(4): 12-16.

[3] 肖淞, 石生尧, 林婧桐, 等. “碳达峰、碳中和”目标下高压电气设备中强温室绝缘气体 SF_6 控制策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 339-357.
XIAO Song, SHI Shengyao, LIN Jingtong, et al. Analysis on the control strategy of the strong greenhouse insulating gas SF_6 in high-voltage electrical equipment under the goal of “emission peak and carbon neutrality”[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 339-357.

[4] 尹旭坤, 董磊, 武红鹏, 等. 面向 SF_6 气体绝缘设备故障检测的光声 CO 气体传感器设计和优化[J]. 物理学报, 2021, 70(17): 82-88.
YIN Xukun, DONG Lei, WU Hongpeng, et al. Design and optimization of photoacoustic CO gas sensor for fault diagnosis of SF_6 gas insulated equipment[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(17): 82-88.

[5] 冯大伟, 闫晓宇, 郝建, 等. 基于紫外光谱的三元混合绝缘油老化状态快速评价方法[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3672-3680.
FENG Dawei, YAN Xiaoyu, HAO Jian, et al. Aging state rapid assessment for 3-element mixed insulation oil based on UV-vis spectrum[J]. Power System Technology,

2022, 46(9): 3672-3680.

[6] 杨为, 柯艳国, 赵恒阳, 等. 基于轻量级卷积神经网络的 GIS 绝缘和机械故障诊断方法[J]. 高压电器, 2023, 59(9): 201-210.
YANG Wei, KE Yanguo, ZHAO Hengyang, et al. Insulation and mechanical fault diagnosis method for GIS based on lightweight convolution neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(9): 201-210.

[7] 李征宇, 高晋文, 高宝明, 等. 基于温度检测的气体绝缘开关接触状态场路结合分析法[J]. 热力发电, 2022, 51(2): 142-149.
LI Zhengyu, GAO Jinwen, GAO Baoming, et al. Field-circuit combination analysis method of contact state of GIS based on temperature measurement[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(2): 142-149.

[8] 牛勃, 孙尚鹏, 魏莹, 等. 微米级异物对 GIS 设备绝缘状态影响研究[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 93-100.
NIU Bo, SUN Shangpeng, WEI Ying, et al. Study on influence of micron-level metal dust on the insulation condition of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 93-100.

[9] 崔家华, 尚智金, 周月婷, 等. 基于共振型光声光谱技术的硫化氢气体检测研究[J]. 中国激光, 2025, 52(7): 207-213.
CUI Jiahua, SHANG Zhijin, ZHOU Yueting, et al. Research on hydrogen sulfide gas detection based on resonance photoacoustic spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2025, 52(7): 207-213.

[10] 栗慧峰, 冯锋. 光声光谱技术和传感器网络下有害气体探测[J]. 计算机仿真, 2022, 39(5): 461-464.
LI Huifeng, FENG Feng. Detection of harmful gases using photoacoustic spectroscopy and sensor networks[J]. Computer Simulation, 2022, 39(5): 461-464.

[11] 郑洪全, 戴景民. 光声光谱技术应用于痕量气体浓度测量的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(1): 1-14.
ZHENG Hongquan, DAI Jingmin. Research development of the application of photoacoustic spectroscopy in measurement of trace gas concentration[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(1): 1-14.

[12] 马凤翔, 赵跃, 赵新瑜, 等. 基于紫外光声光谱的 SF_6 特征分解组分 SO_2 的高灵敏度检测技术[J]. 光子学报, 2023, 52(3): 206-214.
MA Fengxiang, ZHAO Yue, ZHAO Xinyu, et al. High sensitivity detection technology of SF_6 characteristic decomposition component SO_2 based on UV photoacoustic spectroscopy[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(3): 206-214.

[13] 王琦, 王世超, 刘泰余, 等. 光声光谱多组分气体检测技术研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(1): 1-8.
WANG Qi, WANG Shichao, LIU Taiyu, et al. Research progress of multi-component gas detection by photoacoustic spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(1): 1-8.

[14] 贾俊青, 武文丽, 蔡文超, 等. 基于 PSO 的电气设备绝缘故障诊断系统设计[J]. 电子设计工程, 2024, 32(1): 77-81.
JIA Junqing, WU Wenli, CAI Wenchao, et al. Design of electrical equipment insulation fault diagnosis system based on PSO[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(1): 77-81.

[15] 沈恩泽, 张周胜, 张磊. 变压器油中溶解气体光声光谱检测交叉干扰抑制方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2022(10): 104-110.
SHEN Enze, ZHANG Zhousheng, ZHANG Lei. Research on cross-interference suppression method for photoacoustic spectroscopy detection of dissolved gas in transformer oil[J]. Instrument Technique and Sensor, 2022(10): 104-110.

[16] 傅文翔, 董力强, 杨柳. 光声光谱法检测化学毒剂模拟剂及毒害气体研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(12): 3653-3658.
FU Wenxiang, DONG Liqiang, YANG Liu. Research progress on detection of chemical warfare agent simulants and toxic gases by photoacoustic spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(12): 3653-3658.