

基于光谱的SF₆分解物中SO₂浓度检测仪设计

刘伟 毛逸凡 霍思佳 杨帅

Design of spectroscopy-based detector for SO₂ concentration in SF₆ decomposition products

LIU Wei, MAO Yifan, HUO Sijia, YANG Shuai

引用本文:

刘伟, 毛逸凡, 霍思佳, 等. 基于光谱的SF₆分解物中SO₂浓度检测仪设计[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 589–595. DOI: 10.5768/JAO202546.0301006

LIU Wei, MAO Yifan, HUO Sijia, et al. Design of spectroscopy-based detector for SO₂ concentration in SF₆ decomposition products[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 589–595. DOI: 10.5768/JAO202546.0301006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0301006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二氧化硫遥感监测紫外连续变焦镜头光学设计

Optical design of ultraviolet continuous zoom lens for sulfur dioxide remote sensing monitoring

应用光学. 2024, 45(6): 1108–1114 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0601001>

基于紫外差分-自适应干扰对消的NO浓度高精度检测技术

High-precision detection technology of NO concentration based on UV differential-adaptive interference cancellation

应用光学. 2022, 43(6): 1054–1060 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0604003>

基于吸收光谱法的CO₂正压测量技术分析

CO₂ positive pressure measurement technology based on absorption spectroscopy

应用光学. 2022, 43(1): 106–110 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0103006>

气体浓度激光光谱检测温度影响修正研究

Study on temperature influence correction of gas concentration laser spectrum detection

应用光学. 2020, 41(2): 348–353 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0203002>

基于频域吸收峰标定气体浓度的检测方法

Detection method for calibration of gas concentrations based on absorption peaks in frequency domain

应用光学. 2024, 45(1): 142–149 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0103002>

用太赫兹时域光谱法检测沙粒中的微量原油

Detection of trace crude oil in surface sands by THz time-domain spectroscopy

应用光学. 2020, 41(2): 361–365 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0203004>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 03-0589-07

引用格式: 刘伟, 毛逸凡, 霍思佳, 等. 基于光谱的 SF₆ 分解物中 SO₂ 浓度检测仪设计 [J]. 应用光学, 2025, 46(3): 589-595.

LIU Wei, MAO Yifan, HUO Sijia, et al. Design of spectroscopy-based detector for SO₂ concentration in SF₆ decomposition products[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 589-595.



在线阅读

基于光谱的 SF₆ 分解物中 SO₂ 浓度检测仪设计

刘 伟¹, 毛逸凡², 霍思佳², 杨 帅²

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 国网陕西省电力有限公司 西安供电公司, 陕西 西安 710032)

摘 要: 针对电气设备内六氟化硫 (SF₆) 分解物中二氧化硫 (SO₂) 浓度检测问题, 对紫外吸收光谱分析模块设计和数据处理方法进行了研究。采用低功耗脉冲氙灯光源缩短预热时间, 设计了多次反射的长光程气体吸收池, 有效缩短响应时间; 光源和微型光谱仪与气室直接耦合, 减少用气量, 稳定性更好。在 280 nm~320 nm 谱段进行 SO₂ 浓度反演, 采用偏最小二乘回归多元校正方法对 SO₂ 谱段差分吸光度与 SO₂ 浓度建立回归模型, 模型误差小于 0.5 μL/L。设计了检测仪原理样机, 试验验证了设计方案的可行性。

关键词: 紫外吸收光谱法; 气体分析模块; 二氧化硫浓度; 偏最小二乘回归

中图分类号: TN202

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0301006

Design of spectroscopy-based detector for SO₂ concentration in SF₆ decomposition products

LIU Wei¹, MAO Yifan², HUO Sijia², YANG Shuai²

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Xi'an Power Supply Company, State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710032, China)

Abstract: Aiming at the detection of SO₂ concentration in SF₆ decomposition products in electrical equipment, the design of ultraviolet absorption spectrum analysis module and data processing method were studied. Low power consumption pulsed xenon lamp light source was used to shorten preheating time. A long optical path gas absorption cell with multiple reflections was designed to effectively shorten the response time. The gas consumption was reduced, and the light source and micro spectrometer were directly coupled with the gas chamber, so that the stability was better. The SO₂ concentration was inversed in the 280 nm~320 nm spectral band. The partial least squares regression multiple correction method was used to establish a regression model for the differential absorbance of SO₂ spectral band and the SO₂ concentration, and the errors of the model was less than 0.5 μL/L. The principle prototype was designed, and the feasibility of the design scheme was verified by experiments.

Key words: ultraviolet absorption spectrometry; gas analysis module; SO₂ concentration; partial least squares regression

引言

六氟化硫 (SF₆) 气体在开关、互感器、GIS 中

已广泛使用, SF₆ 电气设备的可靠运行是电网安全运行的关键。SF₆ 是充气类电气设备中常用的绝

收稿日期: 2024-03-20; 修回日期: 2024-05-23

基金项目: 国家自然科学基金 (62273274); 国家电网公司科技项目 (5226XA220002)

作者简介: 刘伟 (1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事信号处理研究。E-mail: liuwei@xaut.edu.cn

缘气体,如果设备内部发生故障, SF_6 气体在热、电的作用下会发生分解,并与 GIS 设备内存在的微水、微氧等杂质发生反应,生成一些对故障类型判断有价值的特征气体,利用这些分解产物的含量和变化规律可有效评价设备的运行状况^[1]。 SO_2 是表征 SF_6 绝缘电气设备内部绝缘状态的标志性分解气体,其准确的定量对判断绝缘设备内部的故障类型及严重程度具有重要意义^[2-4]。

目前对 SF_6 分解物中 SO_2 的检测方法主要有:气相色谱法、质谱法、红外光谱法、电化学传感器法等^[5-8]。气相色谱法具有检测灵敏度高、同时检测气体种类多的优点,但是检测时间比较长,主要用于实验室分析,不适合现场检测。质谱法具有同时检测组份多、灵敏度高和分辨率高的优点,但是价格昂贵、操作复杂,会对气体成份造成影响,同时也主要用于实验室分析,并且需要和色谱仪联用,也不适合现场检测使用。红外光谱法具有检测速度快、可在线监测的优点^[9-10],但是存在交叉干扰现象,难以精确测量。电化学传感器具有响应速度快、灵敏度高和价格便宜的优点,但是交叉干扰严重、稳定性差,并且使用寿命较短,也不适合现场使用。紫外吸收光谱法是利用气体分子对紫外光的吸收特征来实现气体浓度的定量检测,具有灵敏度高、抗干扰能力强的优点^[11-13]。 SO_2 气体在紫外谱段具有显著的吸收特征,分别在 190 nm~220 nm 和 280 nm~320 nm 这 2 个谱段具有良好的吸收截面,而 SF_6 在这 2 个谱段不存在吸收,为采用紫外吸收光谱法检测 SF_6 分解 SO_2 提供了理论依据。

本文设计了针对 SF_6 特征分解组份 SO_2 检测的紫外吸收光谱分析模块,并进行了实验室测试,对采集的原始光谱数据进行偏最小二乘回归处理,分析结果达到了检测需求,分析模块为便携式 SF_6 分解气体检测仪器的开发提供了核心器件。

1 紫外吸收光谱法检测 SO_2 原理

朗伯-比尔定律(Lambert-Beer)是光谱定量分析的经典理论。如果入射光波长不变,光吸收程度仅与物质的浓度及光程长度有关,当入射光波长、物质的浓度及温度一定时,物质的吸光度与光程长成正比,这个关系称为朗伯定律。当入射光波长、光程长和物质的温度固定时,物质的吸光度与物质的浓度成正比,这就是比尔定律。如果将

物质的浓度及光程长对光吸收的影响同时考虑时,2 个定律合并,就称为朗伯-比尔定律^[11]。

分子具有特征吸收光谱,通过吸收光谱可以进行分子浓度分析。其测量原理就是 Lambert-Beer 定律:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[L\sigma(\lambda)c] \quad (1)$$

式中: $I_0(\lambda)$ 为波长为 λ 的入射光光强; $I(\lambda)$ 为波长为 λ 的光经过浓度 c 和光程 L 待测物质后的光强; $\sigma(\lambda)$ 为气体分子的吸收截面。

由 Lambert-Beer 定律可以定义吸光度 A , 如式(2)所示:

$$A = \ln \left[\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} \right] = L\sigma(\lambda)c \quad (2)$$

式(2)是指光线通过待测物质前的入射光强度与通过物质后的透射光强度比值的对数,是用来衡量光被吸收程度的一个物理量。从式(2)可知,吸光度与吸光物质的浓度成正比,通过测量物质的吸光度就可得到被测物质的浓度。

SO_2 的紫外吸收截面比较特殊,可以将其吸收截面看成是两部分的叠加:一是随波长缓慢变化的部分,构成光谱的宽带结构;二是随波长快速变化的部分,构成光谱的窄带结构,如式(3)所示:

$$\sigma(\lambda) = \sigma_1(\lambda) + \sigma_2(\lambda) \quad (3)$$

式中: $\sigma(\lambda)$ 为分子的吸收截面; $\sigma_1(\lambda)$ 为吸收截面随波长快速变化的部分; $\sigma_2(\lambda)$ 为吸收截面随波长缓慢变化的部分。

总的吸光度也可以表示为两部分的相加,即:

$$A = A_1 + A_2 = L\sigma_1(\lambda)c + L\sigma_2(\lambda)c \quad (4)$$

综上所述,快变化和慢变化的吸光度都遵循 Lambert-Beer 定律,可以根据需要选择全部的吸光度、快速变化的吸光度或缓慢变化的吸光度进行浓度计算。采用吸收光谱技术测量 SO_2 浓度原理如图 1 所示。

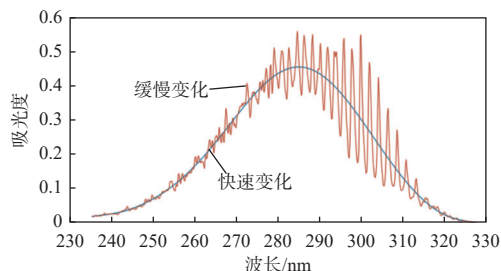


图 1 SO_2 气体光谱吸收特性

Fig. 1 Spectral absorption characteristics of SO_2 gas

2 紫外吸收光谱分析模块硬件设计

紫外气体分析模块主要包含光源、长光程气室、光谱仪、硬件控制与信号采集处理模块,其原理框图如图 2 所示。

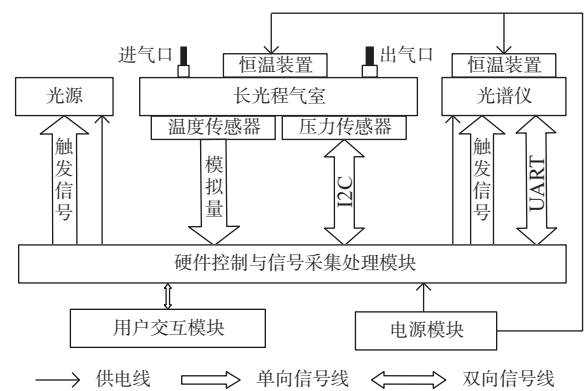


图 2 紫外吸收光谱分析模块原理框图

Fig. 2 Principal block diagram of ultraviolet absorption spectrum analysis module

2.1 光源选取

由于 SO₂ 在 190 nm~230 nm 和 290 nm~310 nm 之间有较好的吸收截面,需要选用覆盖这 2 个波段范围的连续光谱光源,可选的光源主要有深紫外脉冲氙灯和氙灯。虽然氙灯的稳定性更好,但是由于氙灯在使用前需要较长的预热时间,并且使用寿命较短,不适合开发现场使用的便携式分析仪器。脉冲氙灯虽然稳定性不及氙灯,但是其稳定时间更短,平均功耗低、发热量小,几乎开机即可使用。本文设计采用的光源光能衰减到初始值 90% 时可闪烁 10⁹ 次,按照 5 Hz 的闪烁频率,可连续工作 6 年以上,且光能在初始值 50% 以上都可以正常工作。当配合使用的气室光程足够长,还可以弥补光源稳定性带来的波动。

2.2 气室设计

气室是光学气体分析仪的气体传感部件,气室中的光束被流过气室的气体选择性吸收,透过气室的光束便携带了气体的种类和浓度信息,通过对穿过气室光束的光谱进行分析,即可解算出气体的种类和浓度。根据 Lambert-Beer 定律,在气室温度、压力恒定情况下,如果吸光度一定,那么被测气体的浓度和气室光程的乘积是定值,光程越短,监测的气体浓度越高;光程越长,监测的气体浓度越低。对于紫外光谱气体分析仪,能够检测到的吸光度最小值是确定的,增加光程就能提高超低浓度气体的检测能力。本研究中,基于光源

的稳定性指标,为了得到 0.5 μL/L 以下的检测极限,气室的光程需要在 2 m 以上。一般情况下,气室的光程越长,容积就越大,气体检测时的响应时间就越长,消耗气体的数量也就越大,分析仪器的体积也会变大。为了克服这个矛盾,本研究中设计了如图 3 所示的同轴多次反射气室,气室内部为圆柱形,横截面直径为 20 mm,双反射镜间距为 139 mm,光束在两反射镜之间反射 17 次,具有 2.5 m 光程,同时容积小于 45 ml,0.5 L/min 流量的情况下,响应时间可以小于 6 s。气室内部喷涂特氟龙材料,可有效降低气室内壁吸附带来的检测误差,气室中反射镜反光面镀紫外增强反射膜,可提升深紫外光的反射效率。

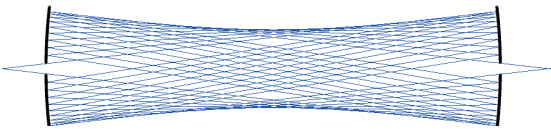


图 3 多次反射长光程气室示意图

Fig. 3 Schematic diagram of multiple reflection long optical path air chamber

光谱仪采用光谱范围覆盖 190 nm~320 nm 的深紫外高光谱分辨率微型光谱仪,光谱分辨率优于 0.35 nm。

2.3 结构设计

常规设计中,光源与气室之间,以及气室与光谱仪之间会采用紫外光纤连接,但是光纤连接会带来实际使用中的问题,比如,光纤需要较大的转弯半径,会占用便携式分析仪器中宝贵的空间资源;光纤固定不可靠时会在运输或使用过程中移位,造成传输光能波动,引起测量误差。另外,光纤的传输效率比较低,深紫外谱段的光谱透过率还会有很明显的老化衰减,影响仪器的使用寿命。考虑到上述原因,本研究中采用了光源和气室、气室和光谱仪之间直接耦合的方式^[14],也就是将光源和光谱仪直接固定在长光程气室的两端,如图 4 所示。

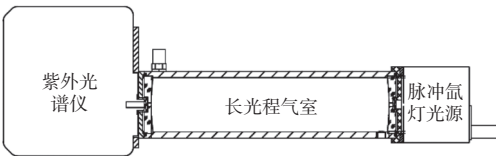


图 4 紫外吸收光谱气体分析模块结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of ultraviolet absorption spectrum gas analysis module

根据气体的气态方程可知,气体的浓度跟气体所占的空间大小、温度和压力是紧密相关的,并且气体的吸收截面也会随着温度的变化而变化。因此,为了检测的准确性,在分析模块设计中对长光程气室进行了恒温处理,温度稳定在 45℃,同时对气室的压力进行实时监测,在气体浓度计算时将压力因素考虑进去。为了保证微型光谱仪的稳定性,避免温度变化导致的性能变化,也对光谱仪进行了温控,温控温度为 45℃。这样,整个模块就不易受到环境温度变化的影响,适合现场使用。图 5 为本文研制的紫外吸收光谱气体分析模块实物。

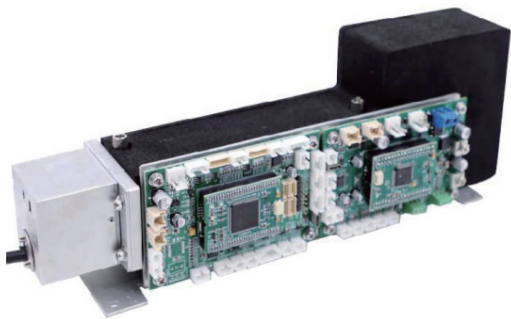


图 5 紫外吸收光谱气体分析模块实物

Fig. 5 Real object of gas analysis module of ultraviolet absorption spectrum

3 数据样本采集

测试系统气路连接示意图如图 6 所示,数据采集现场气路连接图如图 7 所示。钢瓶气通过泄压阀排出后经过一个玻璃三通,三通的一个出气端连接流量计 1,用于监视排空路流量;另一个出气端连接抽气泵,气泵的出口连接被测模块,被测模块后边连接流量计 2,用于观察进入被测模块的流量是否正常。气路连接完成后,模块上电预热,待预热完成后,打开并调节抽气泵,使得流量计 2 的流量稳定在 0.5 L/min;抽空气 5 min,待光谱稳定后保存一组光谱数据;按照标气浓度由低到高的顺序,依次更换装有不同浓度 SO₂ 的标气瓶,打开并调节气瓶装置的减压阀,使流量计 1 的流量稳定

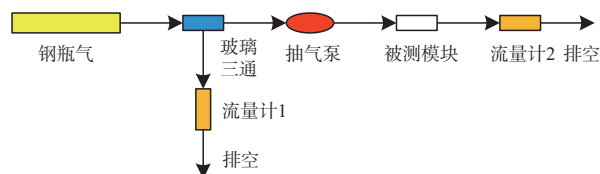


图 6 测试气路原理图

Fig. 6 Schematic diagram of test gas circuit

在 0.1 L/min 左右,保证没有空气进入被测模块气室中,通气 5 min,待光谱稳定后保存光谱数据。

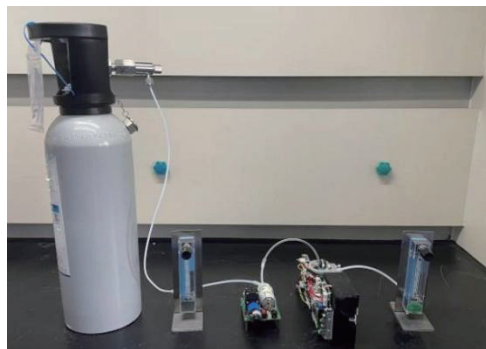


图 7 数据采集现场气路图

Fig. 7 Gas circuit diagram of data acquisition site

测试通入 SO₂ 标准气体的浓度分别为 2 μL/L、5 μL/L、8 μL/L、20 μL/L、50 μL/L、80 μL/L、100 μL/L,现场采集数据的原始光谱如图 8 所示。

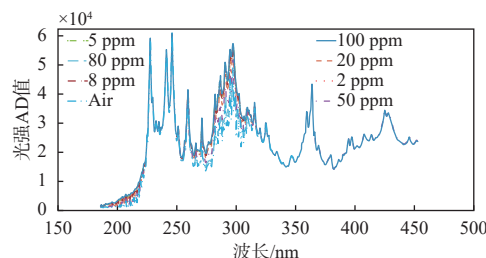


图 8 浓度 100 μL/L 以内 SO₂ 标准气体原始光谱图

Fig. 8 Original spectrum of SO₂ standard gas with concentration within 100 μL/L

4 数据分析

4.1 SO₂ 吸光度的计算

由于环境等因素影响,光学系统不可避免会存在微小的变化,导致光谱信号能量和波长发生变化。为了减小波长漂移影响,计算吸光度之前,需要对光谱进行波长校准,保证背景光谱和吸收光谱没有波长变化。通常以背景光谱作为波长校准的基准,对吸收光谱样本进行校准。本研究根据数据实际情况,对光谱进行了间隔 0.2 nm 插值后,再采用最大相关系数法对样本光谱进行波长校准,校准后计算的 SO₂ 吸光度光谱如图 9 所示。

4.2 SO₂ 波段的选择

由图 9 可以看出,SO₂ 在波长 190 nm~230 nm 和 290 nm~310 nm 范围内有强烈吸收特征,是浓度反演首选的波段^[15-16]。但考虑到本系统的实际情况,由图 8 可知,在波长 190 nm~230 nm 范围内,

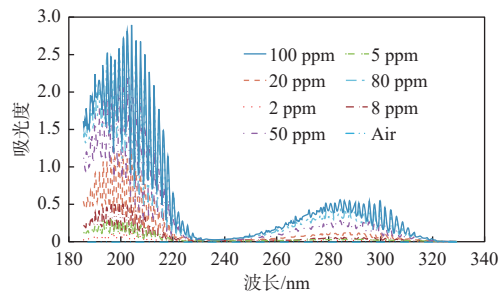


图 9 浓度 100 $\mu\text{L/L}$ 以内 SO₂ 标准气体实测吸光度图谱

Fig. 9 Measured absorbance spectrum of SO₂ standard gas with concentration within 100 $\mu\text{L/L}$

光谱的能量相对波长 290 nm~310 nm 范围内的能量较低, 信号信噪比较差, 且 SO₂ 浓度 100 $\mu\text{L/L}$ 以内吸光度已出现了非线性。因此, 选用波长 280 nm~310 nm 之间的波段进行分析研究, 图 10 为该谱段通过多项式拟合去除基线(缓慢变化部分)后的差分吸光度谱图。

4.3 回归模型的建立

偏最小二乘法是多元线性回归、典型相关分析和主成份分析的继承和发展^[17-18]。本文采用偏最小二乘回归多元校正方法, 对数据矩阵和浓度矩阵同时进行分解, 并在分解时考虑两者之间的相互关系, 加强对应计算关系, 从而保证获得最

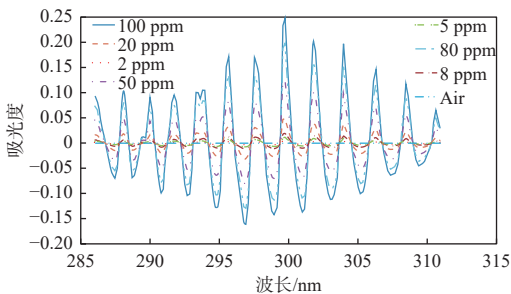


图 10 SO₂ 选用谱段差分吸光度图谱

Fig. 10 Differential absorbance spectrum of SO₂ gas selection section

佳的回归模型。数据矩阵分别选用了差分吸光度矩阵和差分吸光度傅里叶变换幅度矩阵, 并对两种数据建立的回归模型预测结果进行对比分析。

4.3.1 差分吸光度与浓度回归

对差分吸光度进行二次波长校准后, 选取主因子数 1, 建立浓度与差分吸光度回归模型。一条光谱 2 048 个像素, 10 个不同浓度的光谱构成一个 10×2 048 的光谱矩阵, 对该矩阵与对应浓度做偏最小二乘回归, 就得到光谱矩阵和浓度之间的系数关系矩阵。表 1 为利用该回归模型对不同天采集的 3 次样本数据进行预测的结果。

表 1 差分吸光度与浓度回归模型预测结果

Table 1 Prediction results of differential absorbance and concentration regression model

标准气体 种类	标准气体 浓度/ $\mu\text{L/L}$	标定数据			第一次验证数据			第二次验证数据			绝对误差 极差/ $\mu\text{L/L}$
		预测 浓度/ $\mu\text{L/L}$	绝对 误差/ $\mu\text{L/L}$	相对 误差/%	预测 浓度/ $\mu\text{L/L}$	绝对 误差/ $\mu\text{L/L}$	相对 误差/%	预测 浓度/ $\mu\text{L/L}$	绝对 误差/ $\mu\text{L/L}$	相对 误差/%	
SO ₂	100.00	100.20	0.20	0.20	100.39	0.39	0.39	100.51	0.51	0.51	0.12
	20.00	19.89	-0.11	-0.55	19.83	-0.17	-0.86	19.99	-0.01	-0.06	0.16
	2.00	2.13	0.13	6.30	1.94	-0.06	-3.13	2.20	0.20	10.20	0.27
	50.00	49.66	-0.34	-0.68	49.55	-0.45	-0.91	49.74	-0.26	-0.51	0.20
	5.00	4.90	-0.10	-2.01	4.72	-0.28	-5.61	5.07	0.07	1.47	0.35
	80.00	80.00	0.00	0.00	80.01	0.01	0.01	80.12	0.12	0.15	0.11
	8.00	7.95	-0.05	-0.69	7.83	-0.17	-2.09	8.07	0.07	0.89	0.24

对差分吸光度进行傅里叶变换^[19], 求取幅度谱, 结果如图 11 所示。

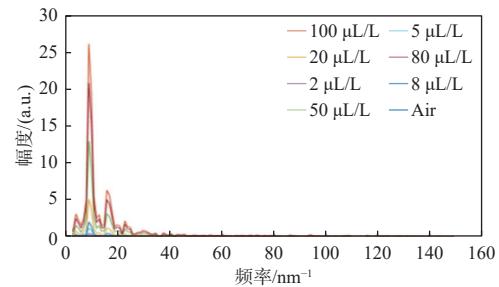


图 11 差分吸光度幅度谱

Fig. 11 Amplitude spectrum of differential absorbance

4.3.2 傅里叶变换差分吸光度幅度与浓度回归

选择频率 0~50 Hz 的幅度谱, 选取主因子数 1, 对幅度谱和浓度进行三阶多项式拟合, 建立幅度谱与浓度回归模型。表 2 为利用该回归模型对不同天采集的 3 次样本数据进行预测的结果。从以上两种模型预测结果来看, 两种模型相对误差和绝对误差差异不明显, 但分析绝对误差极差发现, 第一种模型的预测结果最大偏差为 0.36 $\mu\text{L/L}$, 第二种模型的预测结果最大偏差为 0.35 $\mu\text{L/L}$, 偏差最大值都出现在 5 $\mu\text{L/L}$; 对于浓度 100 $\mu\text{L/L}$ 以内的气体, 第二种模型的预测稳定性均优于或等于第

表 2 差分吸光度幅度谱与浓度回归模型预测

Table 2 Prediction results of differential absorbance amplitude spectrum and concentration regression model

标准气体 种类	标准气体 浓度/ $\mu\text{L/L}$	标定数据			第一次验证数据			第二次验证数据			绝对误差 极差/ $\mu\text{L/L}$
		预测 浓度/ $\mu\text{L/L}$	绝对 误差/ $\mu\text{L/L}$	相对 误差/%	预测 浓度/ $\mu\text{L/L}$	绝对 误差/ $\mu\text{L/L}$	相对 误差/%	预测 浓度/ $\mu\text{L/L}$	绝对 误差/ $\mu\text{L/L}$	相对 误差/%	
SO_2	100.00	100.15	0.15	0.15	100.31	0.31	0.31	100.48	0.48	0.48	0.33
	20.00	19.91	-0.09	-0.44	19.86	-0.14	-0.70	20.03	0.03	0.14	0.17
	2.00	2.22	0.22	11.11	2.04	0.04	1.82	2.31	0.31	15.27	0.27
	50.00	49.73	-0.27	-0.54	49.61	-0.39	-0.78	49.82	-0.18	-0.35	0.22
	5.00	4.98	-0.02	-0.45	4.80	-0.20	-3.94	5.16	0.16	3.18	0.36
	80.00	80.00	0.00	0.00	79.98	-0.02	-0.02	80.14	0.14	0.18	0.16
	8.00	8.01	0.01	0.16	7.90	-0.10	-1.26	8.16	0.16	1.97	0.26

一种模型,随着浓度的增加,第二种模型的预测稳定性优势更为明显。

5 结 论

本文采用紫外吸收光谱法检测 SF_6 分解物中 SO_2 浓度,设计了采用脉冲氙灯光源、多次反射长光程气室和微型紫外光谱仪的紫外吸收光谱气体分析模块方案。该方案中光源与气室,以及气室与光谱仪之间都采用了直接耦合的方式,使得模块体积更小、可靠性更高。完成了样机制作,并搭建气路,进行了气体采集和分析实验。对采集的数据进行分析,发现采用 SO_2 气体在 $280\text{ nm}\sim 320\text{ nm}$ 之间的吸收截面进行气体检测效果更好,主要原因是该谱段光能传输过程中衰减较小,光谱仪采集到的光能量更强,信噪比更高,并且没有交叉干扰。采用偏最小二乘回归多元校正方法对 SO_2 谱段差分吸光度与 SO_2 浓度建立回归模型,对差分吸光度矩阵和差分吸光度傅里叶变换幅度矩阵两种数据建立的回归模型预测结果进行了对比分析,两种模型相对误差和绝对误差差异不明显,均小于 $0.5\text{ }\mu\text{L/L}$,但是傅里叶变换法稳定性更好。研究结果表明,该方案实际可行,可用于便携式 SF_6 分解 SO_2 气体分析仪开发。

参考文献:

- [1] 崔方晓,赵跃,马凤翔,等. FTIR 被动遥测信噪比优化及在变电站 SF_6 泄漏检测应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(5): 1436-1440.
- CUI Fangxiao, ZHAO Yue, MA Fengxiang, et al. Optimization of FTIR passive remote sensing signal-to-noise ratio and its application in SF_6 leak detection in transform

substation[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis[J]. 2021, 41(5): 1436-1440.

- [2] 陈秀珍,郭伟,高凡夫,等. 基于气体分解产物检测技术发现的 SF_6 电气设备放电缺陷分析[J]. 高压电器, 2019, 55(10): 87-92.
- CHEN Xiuzhen, GUO Wei, GAO Fanfu, et al. Analysis of SF_6 electrical equipment discharge defects found based on gas decomposition product detection technology[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 87-92.
- [3] MAHDI A, ABDUL-MALEK Z, ARSHAD R. SF_6 decomposed component analysis for partial discharge diagnosis in GIS: a review[J]. IEEE Access, 2022(10): 27270-27288.
- [4] 窦小晶,叶日新,付纪华,等. SF_6 气体分解产物检测技术及其应用的研究现状[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(7): 24-31.
- DOU Xiaojing, YE Rixin, FU Jihua, et al. Research status of SF_6 gas decomposition product detection technology and its application[J]. Power Grid and Clean Energy, 2019, 35(7): 24-31.
- [5] DONG M, ZHANG C X, REN M, et al. Electrochemical and infrared absorption spectroscopy detection of SF_6 decomposition products[J]. Sensors, 2017, 17(11): 2627.
- [6] 刘海波,杨玉新,张英,等. 基于红外和紫外光谱的现场 SF_6 气体综合检测技术[J]. 工业安全与环保, 2019, 45(4): 67-74.
- LIU Haibo, YANG Yuxin, ZHANG Ying, et al. On site SF_6 gas comprehensive detection technology based on infrared and ultraviolet spectroscopy[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2019, 45(4): 67-74.
- [7] CHEN Y T, ZHANG S L, YAO Q. Research and development of NDIR sensor and its application in on-line detection of CF_4 gas[J]. Journal of Physics: Conference Series,

- 2020, 1634: 012109.
- [8] 马凤翔, 赵跃, 王楠, 等. 基于多通光声池的SF₆分解产物H₂S的高灵敏度检测技术[J]. 光子学报, 2023, 52(3): 258-267.
- MA Fengxiang, ZHAO Yue, WANG Nan, et al. High-sensitivity detection technology of SF₆ decomposition product H₂S based on multi-pass photoacoustic cell[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(3): 258-267.
- [9] 李金义, 樊鸿清, 余子威, 等. 非合作目标TDLAS室内二氧化碳遥测[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 229-236.
- LI Jinyi, FAN Hongqing, YU Ziwei, et al. Indoor CO₂ telemetering of non cooperative target TDLAS[J]. Journal of Instrumentation, 2020, 41(10): 229-236.
- [10] 徐也茗, 庞树峰, 张韫宏. 便携式红外光谱仪关于SO₂高分辨检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2020(S1): 53-54.
- XU Yeming, PANG Shufeng, ZHANG Yunhong. Detection of SO₂ by the compact-FTIR spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020(S1): 53-54.
- [11] 刘海波, 杨玉新, 张英, 等. 紫外差分吸收光谱法定量分析SF₆分解物SO₂和H₂S技术[J]. 工业安全与环保, 2019, 45(3): 21-27.
- LIU Haibo, YANG Yuxin, ZHANG Ying, et al. Quantitative analysis of SF₆ decomposition products SO₂ and H₂S by UV differential absorption spectroscopy[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2019, 45 (3): 21-27.
- [12] 杨宇玲, 郭新良, 崔兆仑, 等. 紫外吸收法检测SF₆分解产物中的H₂S[J]. 高压电技术, 2018, 44(8): 2573-2579.
- YANG Yuling, GUO Xinliang, CUI Zhaolun, et al. Determination of H₂S in SF₆ decomposition products by ultraviolet absorption method[J]. High Voltage Technology, 2018, 44(8): 2573-2579.
- [13] ZHANG Y G, WANG Y D, LIU Y J, et al. Optical H₂S and SO₂ sensor based on chemical conversion and partition differential optical absorption spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2019, 210: 120-125.
- [14] 曾英杰, 支瑜亮, 范贤光, 等. 小型一体式针尖增强拉曼光谱仪设计与评价[J]. 分析化学, 2022, 50(1): 39-46.
- ZENG Yingjie, ZHI Yuliang, FAN Xianguang, et al. Design and evaluation of integrated tip-enhanced Raman spectrometer[J]. Chinese Journal of Analytical Chemical, 2022, 50(1): 39-46.
- [15] CUI Z, ZHANG X, CHENG Z, et al. Quantitative analysis of SO₂, H₂S and CS₂ mixed gases based on ultraviolet differential absorption spectrometry[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2019, 215: 187-195.
- [16] ZHANG X X, ZHANG Y, TANG J, et al. Optical technology for detecting the decomposition products of SF₆: a review[J]. Optical Engineering, 2018, 57(11): 110901.
- [17] 马勇, 肖焱艳, 丁然, 等. 基于紫外吸收光谱与最小二乘法的SO₂, H₂S与CS₂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 SO₂, H₂S and CS₂ gas mixture based on UV absorption spectrometry and least squares algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(3): 157-165.
- [18] 周红, 肖松, 张晓星, 等. 基于紫外差分吸收光谱的痕量SO₂气体定量检测[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5812-5820.
- ZHOU Hong, XIAO Song, ZHANG Xiaoxing, et al. Quantitative determination of trace SO₂ based on ultraviolet differential absorption spectroscopy[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2017, 37(19): 5812-5820.
- [19] CUI Z L, ZHANG X X, CHEN D C, et al. Real-time measurement of SO₂, H₂S, and CS₂ mixed gases using ultraviolet spectroscopy and a least squares algorithm[J]. Applied Spectroscopy, 2021, 75(3): 265-273.