

基于紫外光谱和非色散红外光谱的 SO₂, CS₂, H₂S 和 CF₄ 传感检测技术

张施令

国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆市江北区新胜村 600 号, 重庆市, 401123.

Detection Technology Based on Ultraviolet Spectrum and Non-dispersive Infrared Optical Charged Sensing

Zhang Shiling

State Grid Chongqing Electric Power Company Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing, 401123.

摘要: 本文研究了紫外光谱和非色散红外光学荷电传感的检测技术, 模拟了光谱吸收能力, 提出了浓度反演算法, 提高了仪器的有效检测能力。设计了适用于高压设备在线检测的光学结构, 实现了痕量分解气体成分的在线分析, 并研制了样机。研究了适用于现场的光噪声抑制技术, 设计了能够承受高压设备气压的光路系统, 解决了现场振动和高压设备温度变化对光路结构的影响。根据 SO₂、CS₂、H₂S 和 CF₄ 的类型和含量的变化, 形成专家诊断系统的判断阈值, 预测 GIS 设备的运行状态和故障类型。上述成果为实现 SF₆ 电气设备绝缘状态的在线监测奠定了理论基础, 极大地促进了紫外光谱和非色散红外光学现场传感检测技术的发展和應用。H₂S 和 CF₄ 气体检测的状态检修理论和实践, 保证了 SF₆ 气体绝缘设备的经济可靠运行, 保证了整个电网的安全稳定运行。

关键词: 紫外光谱; 非色散红外光学荷电传感; 光学结构; 高压设备的在线检测; 光路结构

ABSTRACT: The detection technology of the ultraviolet spectrum and non dispersive infrared optical charged sensing is studied, spectral absorption capacity is simulated, and the concentration inversion algorithm is proposed to improve the effective detection capacity of the instrument. The optical structure suitable on on-line detection of high-voltage equipment is designed, the on-line analysis of trace decomposition gas composition is realized, and prototype is developed. The optical noise suppression technology suitable for the field is studied, optical path system is designed to withstand the gas pressure of high-pressure equipment, and the influence of field vibration and temperature change of high-pressure equipment on the optical path structure is solved. The judgment threshold of expert diagnosis system is formed to predict the operation state and fault type of GIS equipment according to the changes of types and contents of SO₂, CS₂, H₂S and CF₄. The above achievements have laid theoretical foundation for realizing the on-line monitoring of insulation status of the SF₆ Electrical equipment, greatly promoted the development and application of ultraviolet spectrum and non-dispersive infrared optical live sensing detection technology, built theoretical system of the fault diagnosis and condition based maintenance of SF₆ gas insulation equipment, and laid the foundation for SF₆ insulation equipment based on trace SO₂, CS₂. The condition based maintenance theory and practice of H₂S and CF₄ gas detection ensure the economic and the reliable operation of SF₆ gas insulation equipment and the safe and stable operation of the whole power grid.

KEY WORD: ultraviolet spectrum; non dispersive infrared optical charged sensing; optical structure; on-line detection of high-voltage equipment; the optical path structure

1 引言

本文将基于紫外光谱和非色散红外光荷电传感检测技术, 实现高压 SF₆ 设备 GIS 中 H₂S、SO₂、CS₂ 和 CF₄ 气体的在线检测, 并开发高压

设备中 H₂S、SO₂、CS₂ 和 CF₄ 气体的在线检测装置[1,2,3]。根据研究内容, 技术路线分为三个部分: 基础理论研究、检测关键技术研究和设备开发应用研究。关键技术包括基于直接吸收技术

的单线谱技术研究、基于单线谱技术的谐波检测理论研究、硬件设计研究、软件设计研究和测试系统的构建[4,5]。在直接吸收技术的基础上,对单线光谱技术进行了研究,包括光谱吸收特性的模拟、温度和压力展宽的影响以及背景气体对吸收光谱的影响。在对谐波检测理论研究的基础上,采用谐波检测原理,进一步提高检测精度。深入研究气体吸收池的材料吸附特性,光学气体吸收池的结构设计与模拟,紫外和中红外光源的驱动技术和调制技术,温度和压力对吸收光谱的影响试验及补偿算法。在线检测装置的硬件设计包括光学气体吸收池、激光驱动系统、激光温度控制系统、小信号放大电路、显示器和人机交互系统[6,7,8]。在线检测装置的软件设计部分包括四个部分:激光驱动与同步解调的软件架构设计与实现、人机交互操作系统选择与软件架构设计、模拟器设计、通信协议开发与设计。SF6设备GIS中H2S、SO2、CS2和CF4气体光纤传感在线检测结构研究。本成果研究了高压GIS设备的特点,采用双管并联光学气体吸收池的技术路线,进行了紫外和中红外探测装置的软硬件设计以及现场工作条件的适应性,并搭建了一套现场检测装置进行了一系列实验。本成果的系统采用模块化设计模式,可并行计算和处理,提高了H2S、SO2、CS2和CF4气体在线检测的数据处理速度和精度。

2 H2S、SO2、CS2和CF4气体在线检测技术光谱吸收的理论分析

吸收光谱的定量分析基于朗伯-比尔定律,该定律建立了吸收剂浓度、吸收强度、光程和光强变化之间的关系:

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp[-\sigma(\nu)CL] = I_0(\nu) \exp[-A(\nu)] \quad (1)$$

两者之间的关系是[9,10]:

$$\sigma(\nu) = S\Gamma(\nu) \quad (2)$$

式中 $\Gamma(\nu)$ (单位: cm)为积分面积归一化的吸收线性函数,即:

$$\int \Gamma(\nu) d\nu = 1 \quad (3)$$

气体分子的吸收谱线强烈依赖于低量子态的

粒子布局数和跃迁几率。前者取决于玻尔兹曼分布方程,后者取决于分子特定跃迁的光谱常数。吸收线强度对玻耳兹曼分布的依赖性导致其对温度的依赖性[11,12]。其关系如下:

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \exp\left[-\frac{hcE''}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \frac{1 - \exp\left(-\frac{h\nu_0}{k_B T}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{h\nu_0}{k_B T_0}\right)} \quad (4)$$

3 基于紫外红外光谱荷电传感检测技术的硬件方案设计

测量技术分为直接吸收法和二次谐波法,二次谐波检测方法复杂,但检测精度高[13]。为了达到更高的检测精度和更好的效果,采用二次谐波法实现检测[14]。由分子数据分析产生的吸收谱线强度计算算法和由吸收谱线强度产生的吸收谱反演算法运行速度很快。微处理器负责信号驱动、采集等,如图1所示。



图1 总体系统架构

Fig 1. Overall system architecture

采用Adsp-403模拟控制器作为协处理器来处理这些并行和高速数据操作。系统型号为pvi-4te-4(碲镉汞光电探测器)。探测器用于收集激光产生的光信号。碲镉汞探测器封装在TO-8中,窗口由BaF2制成。探测器的照片如图2所示。Pvi-4te-4光电探测器采用四级结构,在室温下稳定检测。在15MHz条件下,二次谐波检测频率可达3dB。

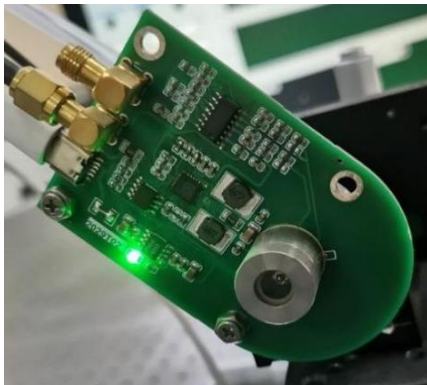


图 2 二次谐波检测激光驱动板系统原理图及实物
Fig 2. Schematic diagram and physical object of laser driving board system for second harmonic detection

由于谐波信号的叠加，模拟信号调制电路与直接吸收电路有很大的不同。根据设计预期，系统需要 1Hz 锯齿波，可由 adsp-403 内部 Da 产生。同时，系统需要约 5KHz 的调制信号，DA 依靠微控制器本身无法产生高频调制信号。该系统采用 DDS 产生芯片 AD9850 产生正弦调制信号，叠加在锯齿波上驱动激光器。通过编写软件控制程序算法，利用 FPGA、嵌入式系统和人机界面构建了 SO₂、CS₂、CF₄ 和 H₂S 气体光学检测装置，实现了系统电源驱动电路、中红外量子级联激光调制驱动电路、温度控制电路的逻辑控制，信号采集放大电路，实现自检、控制、通讯和人机交互，现场检测装置的数据采集接口如图 3 所示。

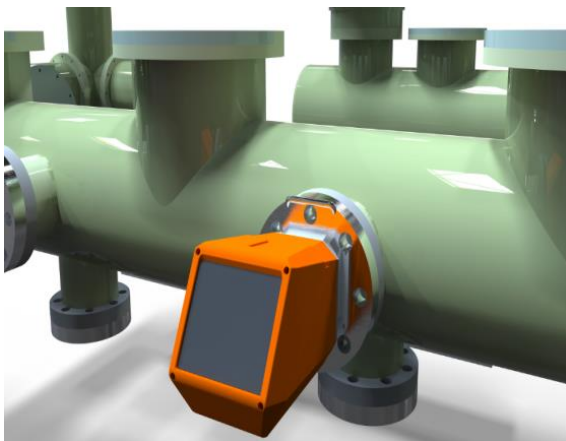


图 3 现场检测装置的数据采集接口
Fig 3. Data acquisition interface of the field detection device

4 设备测试和实验室验证

在基本完成试验样机试验的基础上，进行了一系列实验，验证了仪器的稳定性、重复性、检出限、

交叉干扰等性能。检测样机由光路单元和仪器本体组成。光路单元由空气室、光路反射系统、光电探测器和外壳组成，如图 4 所示。有三个部分需要密封，即扩散孔与光学传感器气室的连接，光源与光学探测器与气室的连接。空气室的内壁由软件中提供的红外金材料制成，光学探测器的表面设置为完美的吸收层，然后进行光线跟踪[15]。光在入射镜和反射镜中表现出高反射率。在出光口被探测器接受后，经过 45 次镜面反射后，入射光束的能量降低到 10.43mW，为入射光强的 52%，如图 5 所示。

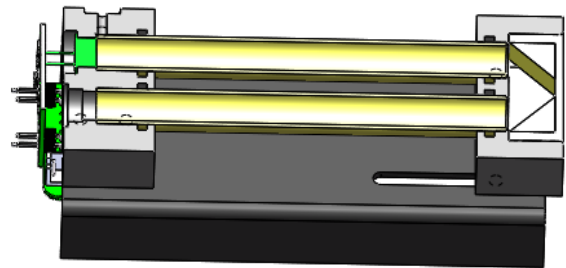
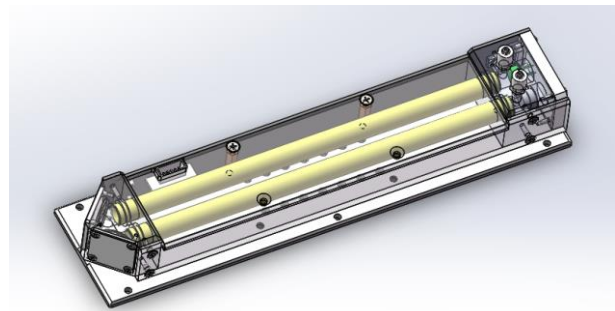


图 4 实验用光路单元照片
Fig 4. Photo of optical path cell for experiment



(a) 射线模拟跟踪



(b) 实验用光路单元

图 5 实验光路单元的光线跟踪模拟与设计
Fig 5. Ray tracing simulation and design of optical path cell for experiment

表 1 气体交叉干扰试验数据
Table 1. Gas cross interference test data

Gas type	Standard value	Instrument			Average value	Standard deviation
		1	2	3		
CO ₂ /SF ₆	2.5%	0	0	0	0	0
CH ₄ /SF ₆	0.5%	0	0	0	0	0
H ₂ S/SF ₆	500ppm	0	0	0	0	0
CO/SF ₆	1%	0	0	0	0	0
SF ₆ /N ₂	1%	0	0	0	0	0

因为气体只吸收特征波长的光，所以对气体光没有吸收作用。因此，从理论上分析，基于光纤传感的气体痕量检测方法不存在交叉干扰。为了分析实验数据，从实验室现有气体中随机选择几种气体，并在系统上进行测试。在实验过程中，使用空气作为背景气体。在每次试验前后，空气用于净化空气室。吹扫过程持续 15 分钟。连续注入试验气体 20 分钟后，记录实验数据。为了验证仪器的稳定性，开发了一个标准气体模块，其光程为 2cm，SO₂、CS₂、CF₄ 和 H₂S 的气体浓度为 50000ppm[16]。模块两端采用蓝宝石窗密封，预留光纤接口。由于分解产物分析仪的标准气室为 100cm 光程，串联标准气模块时需要进行转换。根据比尔-兰伯特定律，估计分解产物分析仪与标准气体模块串联时，显示数据应为 100ppm 左右。将整个实验系统置于恒温试验箱中，设定温度为 28°C，观察一段时间的实验数据，发现仪器数据可以稳定。每 5 分钟取一组数据，分别取出三组数据。实验数据如表 2 所示。

表 2 气体参考模块的实验数据

Table 2. Experimental data of gas reference module

Experimental index Data index	First time	Second time	Third time
1	104.7712	104.6322	104.5309
2	105.22	104.8738	104.5114
3	104.4987	104.9193	104.7812
4	104.5202	104.746	104.5727
5	104.5247	104.7778	104.3578
6	105.085	104.5257	104.7946

7	104.3023	104.7443	104.2468
8	104.6393	104.6072	103.9791
9	104.6392	104.989	104.5348
10	104.6615	104.8419	104.6728
Standard deviation	0.265046	0.225232	0.302998

从表中数据可以看出，标准偏差仅为 0.22~0.30，说明仪器稳定性良好。用高纯氮气吹扫管道，检查气路密封性。确认气密性良好后，打开通风柜，将待测气瓶连接到光路池的进气口，并将水瓶连接到光路池的排气口。再次检查系统气密性良好，确认仪表工作正常。

5 设备测试和实验室验证

将分解产物分析仪与多组分 SF₆ 分解产物发生器 ra5800 连接，利用 ra5800 内置尾气回收装置的调压功能，分别将分解产物分析仪与流动的规定压力 SO₂、CS₂、CF₄ 和 H₂S 气体连接，设定 SO₂ 的压力，CS₂、CF₄ 和 H₂S 气体分别从 0.2 大气压到 2 大气压，并收集谐波原始数据，如图 6 所示，分别在 0.2、0.4、0.8、1.2、1.6 和 2.0 大气压（以 CF₄ 气体为例），研究气体在同一谐波扫描循环中表现出不同的吸收现象。从图中可以看出，吸收线形状逐渐变宽，如图 6 所示。

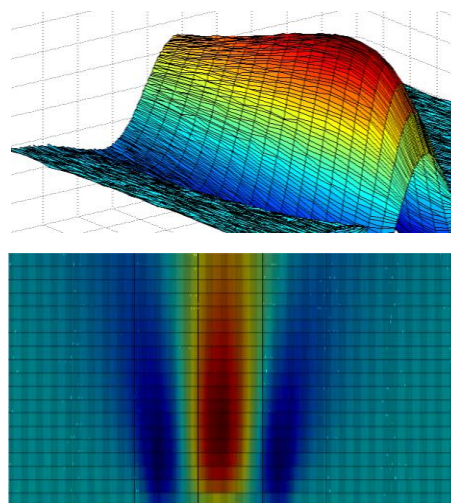


图 6 不同压力下待测气体的二次谐波
Fig 6. Second harmonic of gas to be measured under different pressures

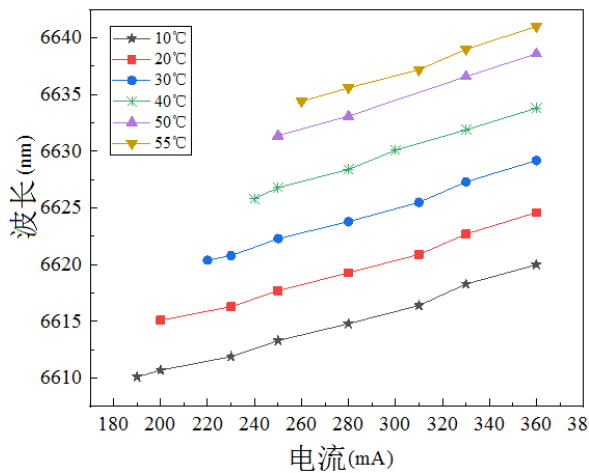


图 7 待测气体在不同温度下的谐波调谐特性曲线
Fig 7. Harmonic tuning characteristic curve of gas to be measured at different temperatures

以电流为横坐标，输出波长为纵坐标，得到不同温度下激光输出波长与电流之间的关系，如图 7 (a) 所示。以温度为横坐标，激光输出波长为纵坐标，得到不同电流下激光输出波长与温度的关系，如图 7 (b) 所示。根据拟合曲线，激光器工作电流 (I) 和输出波长 (λ) 的表达式如 (5) 所示：

$$\lambda(I) = 0.3514I + 3607 \quad (5)$$

拟合优度 R^2 为 0.9999，这表明激光器和驱动电流的线性模型符合良好[17]。根据以上分析，激光输出波长与温度、电流的关系如式 (6) 所示：

$$\lambda(I, T) = k_1 I^2 + k_2 I + k_3 T + C_3 \quad (6)$$

将测量数据带入表达式 (6) 进行拟合，如方程 (7) 所示， $K_1=0.00026$ ， $K_2=0.0503$ ， $K_3=0.3355$ ， $C=3601$ ，拟合优度 R^2 为 0.998，表明激光器与驱动电流的线性模型吻合良好。

$$\lambda(I, T) = 0.00026I^2 + 0.0503I + 0.3355T + 3601 \quad (7)$$

表 3 仪器测试结果

Table 3. Instrument test results

Standard gas concentration(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
20	19.6	19.6	19.5	19.8	19.8
30	29.8	30.5	29.7	30.4	29.8
50	49.7	49.5	49.5	49.8	49.6

从上图可以看出，被测 50ppm 气体在不同条件

下表现出不同的二次谐波吸收线，谐波的峰高和展宽都发生了变化。在 0.6atm 附近，吸收峰的峰高达到上限。随着气压的逐渐升高，二次谐波变宽并开始变宽。为了验证本研究实验的准确性，项目组测量了气体分配器产生的标准气体，并将其与本方案的实验结果进行了比较。采用气体分布器对 50ppm 以下的气体进行配比，采用 ra-1201c 进行检测，并对检测结果进行比较。在实验过程中，项目组首先将待测气体按比例引入仪器。数据稳定后，使用比色管从光路池前端取样，分别在 25ppm、30ppm 和 50ppm 下进行三组试验。从实验数据可以看出，该仪器的精度良好。通过大量实验，项目组证明该仪器具有良好的重复性、线性度和抗交叉干扰能力。同时，由于光纤不传播电磁干扰，仪器具有良好的电磁兼容性。

6 基于激光光谱的气体分析实验研究

传感器的硬件电路系统主要由三个模块组成：光源驱动模块、信号调理模块和控制模块。光源驱动模块的电路如图 8 所示。其功能是为红外光源提供驱动信号。驱动信号为方波信号，频率为 2Hz 和 4Hz，振幅为 5V，占空比为 50%。驱动信号利用单片机输出的高电平和低电平信号控制由场效应管组成的开关对光源进行调制。光源在整个电路中相当于双端器件。然而，与直接使用三极管相比，这种方法可以避免光源工作过程中温度升高后阻抗变化引起的光源辐射不稳定。控制模块电路和敏感元件连接 PCB 板如图 8 所示。

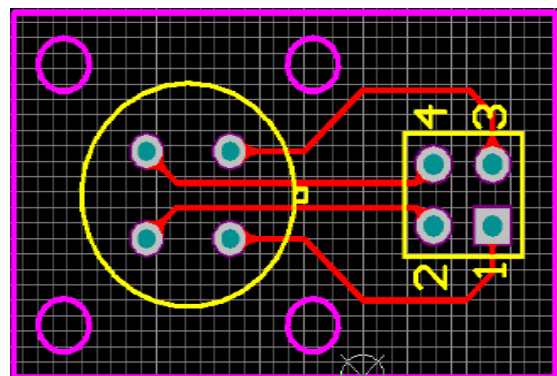


图 8 控制模块电路和敏感元件连接 PCB 板
Fig 8. Control module circuit and sensitive element connection PCB board

光学气体传感器浓度标定目的是得到以下公式：

$$1 - \frac{Act}{Zero \cdot Ref} = Span(1 - e^{-aC^n}) \quad (8)$$

浓度标定实验在长 350mm、宽 300mm、高 300mm 的方形丙烯酸腔体中进行。腔体内部有与杜邦线相连的电路板，然后数据线通过腔体下部的航空插头引出。在测试过程中，传感器输出的数据传输到 PC 端。数据通过 PC 软件接收，物理对象如图 9 所示。光源和探测器的信号通过杜邦线通过 ARM 微处理器引入另一块电路板。光源信号由电路板上的光源驱动模块和信号处理模块进行调制、滤波和放大。无通风时，用示波器采集探测器信号，用前置放大器放大信号，观察信号输出是否正常。将传感器系统放入上述亚克力室内，用气体分配器将被测气体的 1% 浓度与环境中的六氟化硫混合，使亚克力室内的气体浓度达到标定所需的浓度。校准后的传感器分别在上述选定的浓度节点上进行测试，实验显示值如下表 3 所示。

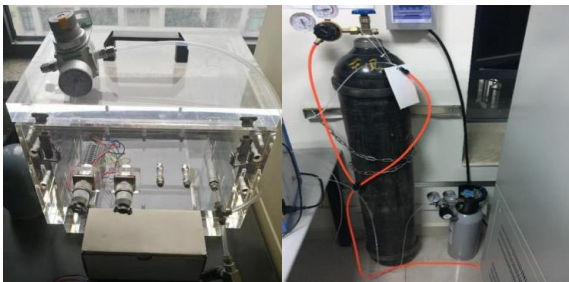


图 9 丙烯酸实验室和实验标准气体
Fig 9. Acrylic chamber for experiment and experimental standard gas

表 3 气体分子组成系数

Table 3. Gas molecular composition coefficient

Ventilation concentration($\mu\text{L/L}$)	Display value($\mu\text{L/L}$)	Full scale error(%F.S)
100	106	0.60%
200	204	0.40%
400	411	1.10%
600	614	1.40%
800	811	1.10%

由于温度会影响测量结果的准确性，系统采用温度传感器 Im61 测量探测器周围的温度，从而进一步应用 RBF 神经网络和粒子群优化的混合算法进行温度补偿。通过拟合传感器在不同气体浓度下的几

组不同温度响应参数曲线，RBF-PSO 算法得到传感器的补偿系数，并将补偿系数引入到最终校正算法中。

7 实时传感检测装置的研制及 GIS 真实测试平台的验证

传感器系统主要包括紫外和红外光源、光吸收气室级红外探测器、数据采集处理单元和必要的物理载体。探测器型号为 pys3228，它集成了两个具有不同中心波长的滤波器。和光敏元件结合，形成测量通道和参考通道。测量通道对应的滤光片中心波长为 $7.75\mu\text{m}$ ，滤光片带宽为 180nm，参考通道对应的滤光片中心波长为 $3.95\mu\text{m}$ ，带宽为 90nm，不吸收 CF_4 和 SF_6 气体的其他分解产物，如图 10 所示。它可以消除由环境因素和系统本身引起的零点漂移引起的测量误差，提高测量精度。

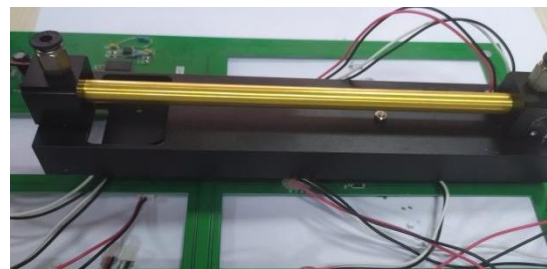


图 10 NDIR 传感器物理结构
Fig 10. NDIR sensor physical structure

激光驱动和检测采用二次谐波技术。采用 max8520e、aduc7026、am335x 等芯片实现温度控制、谐波产生与谐波检测、设备显示接口及通信。待测气体高压在线检测装置如图 11 所示。



图 11 待测气体高压在线检测装置物理图
Fig 11. Physical diagram of high pressure on-line detection device of gas to be tested

法兰式光纤传感在线监测装置经实际加工和光程调整后，内部采用耐腐蚀耐高温密封圈密

封,部分开口处采用密封胶处理。气室内的环形结构上安装了20个内部结构光路装置的光纤准直器。法兰式光纤传感在线监测装置安装在220kV SF₆气体绝缘GIS实时测试平台上,用于验证高压开关柜内部气体含量的在线监测。在220kV SF₆气体绝缘GIS真实试验平台上设置测量气室,高压设备中的HF气体扩散到气室进行在线测量,如图12所示。



图12 法兰在线检测的安装位置

Fig 12. Installation position of flange on-line detection

整个结构光路的设计主要是为了提高系统的可靠性和实用性。激光器被设置为发射光束,光束通过准直器后投射到窗口芯片上。窗口芯片主要起隔离被测气体和空气的作用。折射后,激光进入高压电气设备。在通过目标气体后,光通过棱锥棱镜平行反射回来。反射光再次穿过窗口并到达离轴抛光镜。离轴抛物面反射镜反射聚焦后,光在红外探测器上反射,探测器将接收到的待测光信号转换为电信号,进行信号处理和数据转换。

8 结论

本文研究成果对六氟化硫分解产物 H₂S、SO₂、CS₂ 和 CF₄ 的光荷电传感检测技术进行了系统的理论和实验研究。主要结论如下:

a) 本成果采用了适用于现场的光噪声抑制技术,设计了能够承受高压设备气压的光路系统,解决了高压设备现场振动和温度变化对光路结构的影响。基于这一创新结构,提出了一种拟合 H₂S、SO₂、CS₂ 和 CF₄ 痕量气体浓度的反演算法,采用小波函数和傅立叶计算的融合方法对痕量气体的紫外和红外光谱数据进行处理,从而提高仪器在实验室和现场应用条件下的检测能力。

b) 在高压 GIS 实时实验平台上设置 H₂S、SO₂、CS₂、CF₄ 气体在线检测光路系统,并进

行设备可靠性实验,验证振动、温度、变形等因素对光路系统的影响。进行光噪声消除实验,评估光路干扰效应的抑制能力,并进行光路损耗实验。进行了在线气体检测实验,并对光路系统的自动校准模拟装置进行了校准,以确保光路系统检测痕量 H₂S、SO₂、CS₂ 和 CF₄ 气体的准确性和稳定性。根据 SO₂、CS₂、H₂S 和 CF₄ 类型和含量的变化,形成专家诊断系统判断阈值,预测 GIS 设备的运行状态和故障类型。

参 考 文 献

- [1] Valentina Cecchi, Aaron St. Leger, Karen Miu, Chika O. Nwankpa. Incorporating temperature variations into transmission-line models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2189-2196.
- [2] Buchgraber G, Biro O, Kalcher P, et al. Computation of Temperature Rise in Transformer Bushing Adapters[C]. Dallas, TX, United states: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2003: 836-840.
- [3] DOU Xiaojing, YE Rixin, FU Jihua, et al. Research Status of SF₆ Gas Decomposition Products Detection Methods and Their Application[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(07): 24-31.
- [4] SHEN Du. Research on the Decomposition Characteristics of SF₆ of Solid Insulation Defect in PD of GIS[D]. North China Electric Power University, 2016.
- [5] Xie Hengkun, Ma XinShan, Kao KC. Computation of electric fields and study of optimal corona suppression for bushing-type insulators[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1986, EI-21(1): 41-51.
- [6] ZHANG Xiaoxing, WANG Zhen, HU Yaogai, et al. Recognition of SF₆ Decomposition Components by Two-dimensional Infrared Spectroscopy[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(06): 1475-1479.
- [7] ZHANG Xiaoxing, WU Faqing, TIE Jing, et al. TiO₂ Nanotube Array Sensor for Detecting SF₆ Decomposition Component SO₂F₂[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3396-3402.
- [8] HUANG H Y, YU Y Z, ZHANG M H. Analysis of adsorption properties of SF₆ decomposed gases (SO₂F₂, SO₂F₂, SF₄, CF₄, and HF) on Fe-doped SWCNT: A DFT study[J]. Applied Surface Science, 2020, 505.
- [9] LIU H C, ZHOU Q, ZHANG QY, HONG C X, et al. Synthesis, Characterization and Enhanced Sensing Properties of a NiO/ZnO p-n Junctions Sensor for the SF₆ Decomposition Byproducts SO₂, SO₂F₂, and SO₂F₂[J]. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2017, 17(4).
- [10] FÁ A J G, Faccio R, López-Corral I. Detection of SO₂F₂ and SO₂F₂ through aluminium nitride nanosheets: A DFT study[J]. Applied Surface Science, 2021, 538: 147899.
- [11] YUN Yuxin, LV Tianguang, HAN Hong, et al. Effects of pressure and temperature on gaseous infrared absorption properties[J]. Effects of pressure and temperature on gaseous infrared absorption properties[J]. Infrared and Laser

- Engineering, 2011, 40(06): 992-996.
- [12] QIU Zongjia, LI Kang, WAN Liujie, et al. Infrared Absorption Characteristic of Decomposition Products COF₂ and N₂O of SF₆/N₂ Gas Mixtures[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(08): 2890-2896.
- [13] LI Xingwen, DENG Yunkun, JIANG Xu, et al. Insulation Performance and Application of Environment-friendly Gases Mixtures of C₄F₇N and C₅F₁₀O with O₂[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(08): 2890-2896.
- [14] Zhang Liangxian, Chen Mosheng, Peng Zongren et al. Eddy current loss calculation and shield analysis of UHV converter transformer[J]. TRANSFORMER, 2013, 50(3): 15-21.
- [15] Shibao Zhang. Evaluation of thermal transient and overload capability of high-voltage bushings with ATP[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1295-1301.
- [16] CHEN Xiaohui. Discuss the Application and State Maintenance of GIS Equipment in Power System[J]. New Technology & New Products of China, 2014, 18: 73-74.
- [17] NIU Hao, QIU Yue. Study on Typical Influencing Factors of SF₆ Decomposition Product Detection in GIS[J]. Zhejiang Electric Power, 2018 ,37(08): 59-60.

作者简介:

张施令 (1986年-), 男, 重庆市, 博士, 高级工程师, 研究方向为高电压与绝缘技术。