

FTIR 被动遥测信噪比优化及在变电站 SF₆ 泄漏检测应用

崔方晓¹, 赵跃², 马凤翔², 吴军^{1*}, 王安静¹, 李大成¹, 李扬裕¹

1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031
2. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230022

摘要 被动 FTIR 红外遥测技术可应用于气体泄漏检测, 气体检测下限与仪器信噪比密切相关。仪器信噪比与测量参数有关, 如光谱分辨率、采样频率、积分时间、平均次数等, 如何结合实际应用优化参数组合以实现最佳信噪比, 目前还缺少系统分析。针对这一问题, 从理论上分析了这些参数与信噪比关系, 并归类为三个方面: (1)光谱分辨率, 引用了 Roland Harig 给出的结论, 当光谱分辨率低于特征峰半高全宽时, 信噪比不变, 但为了避免背景气体的交叉干扰, 分辨率不宜设置过低, 需要结合实际应用综合考虑; (2)降低采样频率能够减少计算量, 缩小光谱范围, 但采样频率和光谱范围与信噪比无关; (3)在积分时间和光谱平均次数方面, 同样时间条件下, 多次干涉图采集会引入零光程差的采样误差, 使得噪声大于理论计算值, 因而长积分时间获得信噪比优于多次平均。开展了六氟化硫(SF₆)泄漏检测实验, 根据 SF₆ 特征峰宽度选择 4 cm⁻¹分辨率, 20 kHz 采样频率兼顾了信噪比和检测时间, 并利用 FTIR 巡检系统发现变电站泄漏点, 证明了方法的有效性。

关键词 傅里叶变换红外光谱; 被动遥测; 信噪比; 六氟化硫

中图分类号: TP722.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)05-1436-05

引言

六氟化硫(SF₆)气体绝缘设备广泛应用于电力行业, 已成为超/特高压输变电和城市供电系统的核心装备之一。当前气体绝缘设备泄漏故障频发, SF₆ 气体绝缘设备发生泄漏, 直接影响设备的绝缘水平, 大量补气 and 检测工作增加了运维人员的负担。运行中的 SF₆ 气体可能含有剧毒的气体分解产物, 设备泄漏可能危害运维人员的安全。另一方面, SF₆ 气体温室效应是 CO₂ 的 23 900 倍, 气体泄漏会引发环境污染。因而 SF₆ 气体泄漏检测已经成为设备投运和日常运维的重要环节。

被动 FTIR 遥感技术可用于气体遥测识别, 已经用于管道甲烷等气体泄漏检测^[1-2]。气体检测能力与系统的信噪比密切相关, 系统信噪比与光谱分辨率、采样频率、积分时间和平均次数等参数有关, 目前文献分析了部分参数影响。Flanigan 利用 MODTRAN 仿真分析了低仰角天空背景的被

动 FTIR 遥测系统的检测极限, 指出信噪比与光谱分辨率呈反比, 对于被动遥测系统影响较小, 但影响不同的物质区分度^[3], 因此需要对光谱分辨率进行权衡决定。Mao 等分析了卫星反演 CO₂ 浓度与光谱分辨率关系, 根据 CO₂ 浓度灵敏度需求推导光谱分辨率要求^[4]。Harig 对于信噪比与分辨率关系进行了分析^[5], 指出分辨率在达到气体特征峰半高全宽(full width at half maximum, FWHM)后, 信噪比与分辨率无关。在实际应用中, 除了分辨率外, 测量光谱还需要设置采样频率、光谱范围、积分时间、光谱平均次数等参数, 这些参数如何影响系统信噪比, 以及如何优化设置参数, 目前还缺乏完整分析。

针对变电站 SF₆ 泄漏检测应用需求, 分析了光谱信噪比与光谱分辨率、采样频率、光谱范围、积分时间和平均次数的影响, 从理论分析了各个参数对于信噪比的作用, 并提出了针对 SF₆ 检测的参数优化, 对于红外遥测技术在气体泄漏检测应用具有重要意义。

收稿日期: 2020-05-06, 修订日期: 2020-08-21

基金项目: 中国科学院实验室创新基金项目(CXJJ-19S002), 中国科学院重点部署项目(KGFZD-135-16-002-2)和国家自然科学基金项目(41505020)资助

作者简介: 崔方晓, 1985 年生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所助理研究员 e-mail: fxcui@aiofm.ac.cn

* 通讯作者 e-mail: wujun@aiofm.ac.cn

1 FTIR 信噪比影响因素分析及参数优化

系统的噪声用噪声等效辐射亮度(noise equivalent spectral radiance, NESR)表示^[5]

$$\text{NESR} = \frac{\sqrt{A_D}}{\Theta \epsilon \Delta \sigma \sqrt{t} D^*} \quad (1)$$

式(1)中, NESR 单位 $\text{W} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})^{-1}$; A_D 是探测器面积, 单位 cm^2 ; Θ 是光学系统入瞳孔径, 单位 $\text{sr} \cdot \text{cm}^2$; ϵ 是光学系统效率; $\Delta \sigma$ 是仪器的原始光谱分辨率, 即没有考虑切趾等数学处理, 单位是 cm^{-1} ; t 是采集一幅干涉图的积分时间, 单位 s; D^* 是探测器的探测率, 单位 $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

考虑 FTIR 一次扫描过程获得单幅双边干涉图, 测量时间 $t = 2\sigma_L / (\Delta \sigma f_s)$, 其中 σ_L 表示最大频率(波数最大值), f_s 表示采样频率, $\Delta \sigma$ 表示光谱分辨率, 则一副双边干涉图的 NESR 表示为

$$\text{NESR} = \frac{\sqrt{2A_D f_s}}{\Theta \epsilon D^* \sqrt{\sigma_L \Delta \sigma}} \quad (2)$$

气体遥测可用三层模型描述^[5], 目标气体云团导致辐亮度变化为 $\Delta L(\sigma)$

$$\Delta L(\sigma) = [1 - \tau(\sigma)] \Delta L_{\text{cb}} \quad (3)$$

式(3)中, σ 为波数; $\tau(\sigma)$ 为目标气体的透过率; ΔL_{cb} 为云团温度等效黑体辐亮度与背景辐亮度之差, 当云团温度高于背景温度时, $\Delta L_{\text{cb}} > 0$, 反之 $\Delta L_{\text{cb}} < 0$ 。

当目标气体为薄云团时, 目标气体的透过率可近似表达为

$$1 - \tau(\sigma) = 1 - e^{-\alpha(\sigma)cL} \approx \alpha(\sigma)cL \quad (4)$$

式(4)中, $\alpha(\sigma)$ 为吸收系数光谱; cL 为气体的浓度程长积。

近地面附近测量的气体吸收光谱存在展宽效应, $\alpha(\sigma)$ 可用洛伦兹线型表示

$$\alpha(\sigma) = \alpha_0 \frac{\gamma^2}{\gamma^2 + (\sigma - \sigma_0)^2} \quad (5)$$

式(5)中, α_0 表示吸收线强度; γ 为展宽后吸收系数光谱的半高全宽; σ_0 为吸收线波数位置。

将式(4)和式(5)代入式(3), 得到目标信号辐亮度为

$$\Delta L(\sigma) \approx \alpha_0 cL \Delta L_{\text{cb}} \frac{\gamma^2}{\gamma^2 + (\sigma - \sigma_0)^2} \quad (6)$$

利用 FTIR 光谱仪测量气体过程中, 仪器的线型函数(instrument line shape, ILS)会对气体光谱特征产生平滑和展宽作用^[6-8], 仪器测量的目标信号辐亮度为 $\Delta L_m(\sigma)$

$$\Delta L_m(\sigma) = \Delta L(\sigma) \otimes \text{ILS}(\sigma) \quad (7)$$

式(7)中, $\Delta L_m(\sigma)$ 表示仪器测量辐亮度; \otimes 表示卷积; $\text{ILS}(\sigma)$ 为仪器线型函数。

系统获取的目标信号信噪比可表示为

$$\text{SNR}(\sigma) = \frac{|\Delta L_m(\sigma)|}{\text{NESR}} \quad (8)$$

式(8)中, $|\cdot|$ 表示取绝对值。

综合式(6)、式(7)和式(8)可以看到, 气体的吸收线强度 α_0 、浓度程长积 cL 、背景和云团温差 ΔL_{cb} 这三个因素是外部客观因素, 无法通过人为调整改善信号强度。对于待测气体组分, 其吸收强度 α_0 已知, 信号检测下限与 cL 和 ΔL_{cb}

成正比。ILS(σ) 和 NESR 是与仪器相关因素, 可以通过参数优化使信号增强或者噪声降低, 提高信噪比。ILS(σ) 和 NESR 与光谱分辨率、采样频率、光谱范围、积分时间、光谱平均次数有关, 需要分析这些参数与信噪比关系。

1.1 信噪比与光谱分辨率关系

Roland Harig 已经论述了 FTIR 信噪比与光谱分辨率关系^[5], 对于仪器分辨率远低于吸收线宽度(即分辨率数值远大于气体吸收峰宽), 此时仪器接收到的气体辐亮度 ΔL_m 为

$$\begin{aligned} \Delta L_m(\sigma_0) &= \int_{-\infty}^{\infty} \Delta L(\sigma') \text{ILS}(\sigma - \sigma') d\sigma' \\ &\approx \int_{-\infty}^{\infty} \Delta L(\sigma') \text{ILS}(0) d\sigma' \\ &\approx \frac{-2\pi\alpha_0 cL \gamma \Delta L_{\text{cb}}}{\Delta \sigma} \end{aligned} \quad (9)$$

将式(9)和式(1)代入式(8), 得到信噪比 SNR 为

$$\text{SNR}(\sigma_0) = \frac{-\pi\alpha_0 cL \gamma \Delta L_{\text{cb}} \Theta \epsilon D^* \sqrt{t}}{\sqrt{A_D}} \quad (10)$$

从式(10)可以看到, 当分辨率远低于气体吸收线宽时, SNR 与光谱分辨率无关。

当仪器分辨率远高于吸收线宽度时(即分辨率数值远小于气体吸收峰宽), 此时仪器接收到的气体辐亮度 ΔL_m 为

$$\begin{aligned} \Delta L_m(\sigma_0) &= \int_{-\infty}^{\infty} \Delta L(\sigma') \text{ILS}(\sigma - \sigma') d\sigma' \\ &\approx \int_{-\infty}^{\infty} \Delta L(\sigma_0) \text{ILS}(\sigma_0 - \sigma') d\sigma' \\ &\approx \Delta L(\sigma_0) \end{aligned} \quad (11)$$

将式(11)和式(2)代入式(8), 得到信噪比 SNR 为

$$\text{SNR}(\sigma_0) = \frac{\Delta L(\sigma_0) \Theta \epsilon D^* (\sigma_L \Delta \sigma)^{1/2}}{\sqrt{2A_D f_s}} \quad (12)$$

由式(12)可以看到, 当仪器分辨率数值远小于气体分子线宽度时, 仪器接受的辐亮度就是气体分子引起的辐亮度变化, 与仪器分辨率无关, 即分辨率远高于分子吸收线宽时, 仪器灵敏度与分辨率无关。此时信噪比与分辨率数值成正比, 分辨率越低, 信噪比越高。

实际应用中, 分辨率并不是越低越好, 还需要考虑其他气体的干扰, 当分辨率过低时, 不同气体存在交叉干扰, 会造成虚警, 需要根据实际应用选择合适的分辨率。

1.2 信噪比与采样频率、光谱范围关系

FTIR 仪器通常采用 He-Ne 激光器作为干涉图采集步长校准源, 激光器波长决定了能够检测的光谱范围, 即

$$\sigma_L = \frac{1}{2\lambda_{\text{He-Ne}}} \quad (13)$$

考虑一幅双边干涉图, 最大光程差为 x_L , 动镜的平均移动速度为 v_{mirror} , 采样时间 t 可分别示为频域和时域形式

$$t = 2\sigma_L / (\Delta \sigma f_s) = x_L / v_{\text{mirror}} \quad (14)$$

不考虑切趾等数学处理, 光谱分辨率 $\Delta \sigma$ 与光程差 x_L 成反比关系, 即 $\Delta \sigma = 1/x_L$, 由式(14)得到采样频率为

$$f_s = 2\sigma_L x_L \quad (15)$$

由式(15)得到, 当光谱分辨率 $\Delta \sigma$ 确定后, 光程差 x_L 也随之确定, 采样频率 f_s 与波数最大值 σ_L 呈正比关系。干涉图的采样步长可以设定为激光波长的整数倍, 令 $p = 1, 2, \dots, N$, 使得采样频率和光谱范围同步变化

$$\begin{cases} \sigma_L = \frac{1}{2\rho\lambda_{\text{He-Ne}}} \\ f_S = 2\sigma_L x_L = \frac{x_L}{\rho\lambda_{\text{He-Ne}}} \end{cases} \quad (16)$$

如 Bruker 的 OPAG33 光谱仪使用的 He-Ne 激光器波长为 632.8 nm, 可检测最大波数 $\sigma_L = 7901.4 \text{ cm}^{-1}$, 当采用 2 倍激光器波长作为采样步长时, 最大可检测波数为 $\sigma_L = 3950.7 \text{ cm}^{-1}$. 增加采样步长可以减少干涉图点数, 降低计算量并缩小光谱范围, 但也会造成频率混叠, 造成伪像。

当光谱分辨率和动镜速度确定后, 采样时间 t 也随之确定, 且与采样频率和光谱范围无关, 根据式(10)和式(12), 信噪比与采样频率和光谱范围无关。

1.3 信噪比与积分时间、光谱平均次数关系

根据式(1), 增加积分时间会降低 NESR, 但在相同测量时间内对多幅光谱平均似乎也能达到同样效果, 这里对这两种方式的优劣进行分析。

设定动镜高速运动时平均速度为 $v_{\text{mirror-fast}}$, 为低速平均速度 $v_{\text{mirror-slow}}$ 的 k 倍, 即 $v_{\text{mirror-slow}} = v_{\text{mirror-fast}}/k$, 则高速运动和低速运动的花费时间关系为 $t_{\text{mirror-slow}} = kt_{\text{mirror-fast}}$. 根据式(1),

$$\|S_1(\sigma_i) - S_2(\sigma_i)\| = \lambda_{\text{He-Ne}} \sqrt{I_{\text{ZPD1}}^2(n_1) + I_{\text{ZPD2}}^2(n_2) - 2I_{\text{ZPD1}}(n_1)I_{\text{ZPD2}}(n_2)\cos[j2\pi\sigma_i(n_1 - n_2)\lambda_{\text{He-Ne}}]} \quad (19)$$

式(19)中, $\|\cdot\|$ 表示取复数的模。

由于 $n_1 \neq n_2$, 则 $\|S_1(\sigma_i) - S_2(\sigma_i)\| > 0$, 其对应的辐亮度差异为 $\Delta L_{12} = \|L_1(\sigma_i) - L_2(\sigma_i)\| > 0$. 多次平均的 NESR 需要加上一次扫描过程中 ZPD 采样差异导致的辐亮度变化, 即

$$\text{NESR}_{\text{kmean}} = (\text{NESR}_{\text{mirror-fast}} + \Delta L_{12})/\sqrt{k} > \text{NESR}_{\text{mirror-slow}} \quad (20)$$

这里仅考虑了一次扫描与其他的采样差异, 实际应用中进行多次测量平均, 每次测量都会存在采样差异, 多次平均和长时间积分 NESR 差异也远大于式中表述的差异. 因此, 在花费同样时间条件下, 采用长时间积分获得信噪比优于光谱多次平均。

2 变电站 SF₆ 泄漏检测应用

变电站 SF₆ 通常是微量泄漏, 提高检测下限需要较高信噪比, 分别从光谱分辨率、扫描速率(积分时间)和平均次数考虑. 首先需要根据 SF₆ 特征峰宽度选择合适的光谱分辨率, 图 1 是从 NIST 数据库获取的 SF₆ 吸收系数谱线, 可以看到 SF₆ 特征峰 FWHM 为 3.68 cm^{-1} , 根据 1.3 节分析, 当分辨率低于 3.68 cm^{-1} 时, 仪器信噪比基本不变; 实际测量中还需要考虑大气干扰, 使用较低分辨率虽然能够获取相同信噪比, 但由于大气中水汽等气体干扰, 有可能导致 SF₆ 特征波段也出现响应虚警, 因而还需要考虑分辨大气和 SF₆ 峰形不同。

图 2 是仿真不同分辨率的大气和 SF₆ 透过率谱, 其中图 2(a)是利用 MODTRAN 仿真 1 km 的大气透过率谱, 可看到当 1 cm^{-1} 分辨率时灵敏度最高, 水汽的吸收峰非常明显; 当分辨率降为 4 cm^{-1} 时, 仍可从光谱峰形区分大气和 SF₆ 特

得到两者 NESR 关系为 $\text{NESR}_{\text{mirror-slow}} = \text{NESR}_{\text{mirror-fast}}\sqrt{k}$. 在动镜高速运动条件下, 记连续测量 k 幅光谱平均值为 $\text{NESR}_{\text{kmean}}$, 如果每幅干涉图采样点位置完全一致, 则 $\text{NESR}_{\text{kmean}} = \text{NESR}_{\text{mirror-fast}}/\sqrt{k}$. 但在实际应用中, 由于光谱仪内部温度变化, 每次扫描干涉图过程采集零光程差(zero point difference, ZPD)不完全一致, 会引入更多误差^[9]。

设定干涉图的采样步长为激光器波长, 采集双边干涉图的离散形式 $I(n)$ 为

$$I(n) = \frac{1}{\lambda_{\text{He-Ne}}} \sum_{i=-N}^{i=N} S(\sigma_i) e^{-2\pi i n \lambda_{\text{He-Ne}}} \quad (17)$$

式(17)中, S 表示离散形式的光谱; σ_i 表示离散形式的波数, $i = -N, -N+1, \dots, 1, 2, \dots, N$, 其中 $N = \sigma_L/\Delta\sigma$.

经 FFT 变换后的光谱离散表达式为

$$S(\sigma_i) = \lambda_{\text{He-Ne}} \sum_{n=-N}^{n=N} I(n) e^{j2\pi\sigma_i n \lambda_{\text{He-Ne}}} \quad (18)$$

由于存在采样误差, 设定第一次采样零点光程差的干涉图为 $I_{\text{ZPD1}}(n_1)$, 第二次采样零点光程差的干涉图为 $I_{\text{ZPD2}}(n_2)$, 则两次采样的光谱强度差异为

征; 当分辨率降低到 8 cm^{-1} 时, 水汽吸收峰和图 2(b) 的 SF₆ 吸收峰不可区分, 综合考虑 SF₆ 最佳分辨率是 4 cm^{-1} 。

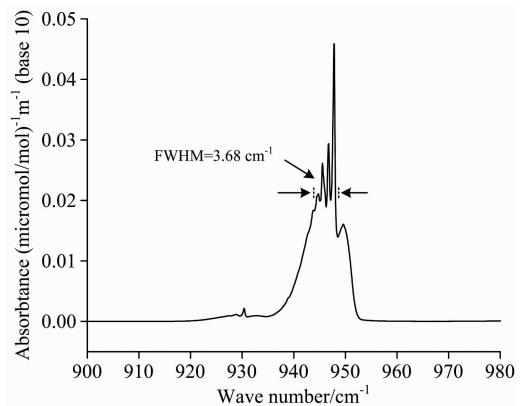
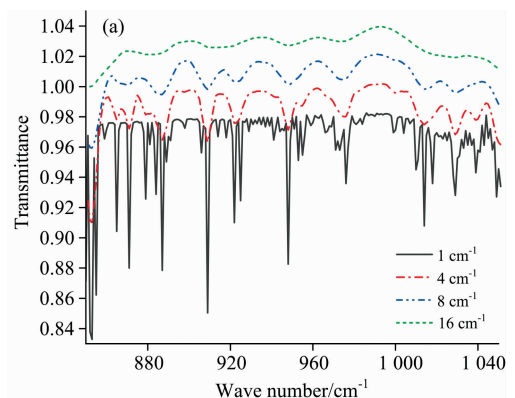


图 1 从 NIST 数据库获取的 SF₆ 吸收系数谱, 其 FWHM 约为 3.68 cm^{-1}

Fig. 1 Absorbance spectrum of SF₆ from NIST database, of which FWHM is 3.68 cm^{-1}



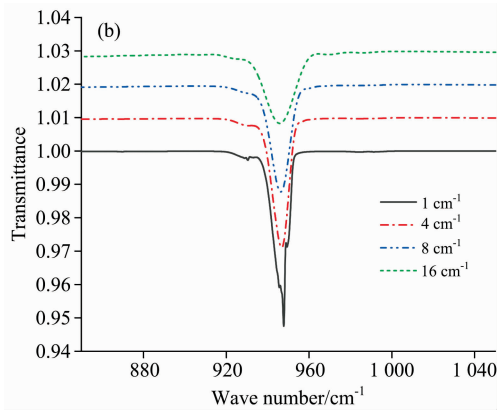


图 2 仿真不同分辨率的大气和 SF₆ 透过率谱, 为了便于观察, 光谱进行了平移

(a): 利用 MODTRAN 仿真 1 km 大气透过率谱;
(b): 仿真 2 ppm m 的 SF₆ 透过率谱

Fig. 2 Simulated transmittance spectra of atmosphere and SF₆ with different spectral resolution, all spectra shifted for clarity

(a): Transmittance of atmosphere in 1 km by MODTRAN;
(b): Transmittance of SF₆ with 2ppm m

采用 Bruker 公司的 OPAG33 型光谱仪在变电站开展 SF₆ 检测实验, 仪器参数如表 1 所示, 实验现场如图 3 所示。光谱仪搭载在 AGV 小车上, 沿着地上的导轨前进, 在每个检测点光谱仪扫描获取该位置设定扫描区域的泄漏信息, 如果发现泄漏则通过软件发出警报。

表 1 Bruker OPAG33 型光谱仪参数

Table 1 Parameters of Bruker OPAG33 spectrometer

名称	参数
光谱分辨率	最高 1 cm ⁻¹
光谱范围	700~5 000 cm ⁻¹
探测器类型	斯特林制冷 MCT(碲镉汞)探测器
NESR	3.3×10 ⁻⁹ W·(cm ² ·sr·cm ⁻¹) ⁻¹ (扫描速率 40 kHz, 分辨率 4 cm ⁻¹ , 背景温度 T _b =30 °C, 1 000 cm ⁻¹ 时的典型值)
探测距离	3~5 km
仪器视场角	30 mrad
采样频率	可选 10, 20, 40, 80 kHz

OPAG 提供了多种扫描频率可选, 扫描频率越低, 动镜移动速度越慢, 积分时间越长。根据前文分析, 增加积分时间优于多次平均。综合所有可选参数, 采用了 20 kHz 采样频率, 采集 1 幅光谱的检测时间约为 0.5 s, 在提高信噪比的同时, 保证了检测速度, 最终选择的参数如表 2 所示。

在检测系统巡检过程中, 检测到图 3 标记的泄漏点一处。减去背景辐亮度后 SF₆ 特征如图 4 所示, 可以看到 SF₆ 特征远远强于噪声波动, 同时可以看到, 在 925~975 cm⁻¹ 存在臭氧特征峰, 在 800~900 cm⁻¹ 存在水汽特征峰, 通过混合分离算法扣除臭氧和水汽特征后, 利用识别算法对 SF₆ 特征进行识别和报警。



图 3 变电站检测现场, FTIR 光谱仪搭载在 AGV 小车上对变压器进行巡检

Fig. 3 In transform substation, FTIR spectrometer is mounted on a AGV vehicle for inspection

表 2 选择的测量参数

Table 2 Selected measurement parameter

名称	选择参数
光谱分辨率	4 cm ⁻¹
采样频率	20 kHz
平均次数	1 幅光谱, 不平均

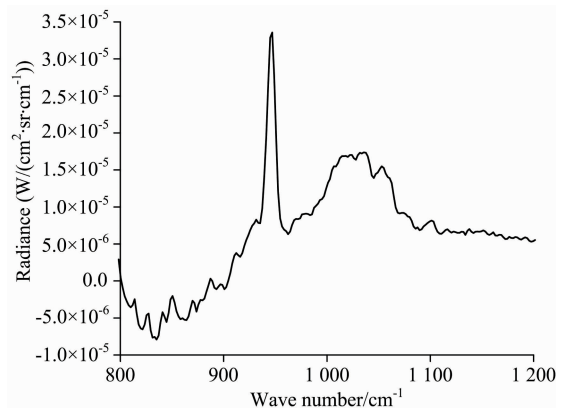


图 4 检测到泄漏点 SF₆ 的辐亮度差谱

Fig. 4 Radiance differential spectrum of SF₆ at leakage point

3 结 论

被动 FTIR 遥测微量气体时, 系统信噪比是决定检测下限的关键因素。针对变电站 SF₆ 泄漏检测需求, 分析了光谱分辨率、采样频率、光谱范围、积分时间、平均次数与信噪比关系, 得到如下结论: (1) 适当降低光谱分辨率能够提高信噪比, 当光谱分辨率和待测气体特征峰半高全宽相近时信噪比最优, 并且可以减少背景气体干扰导致的虚警; (2) 采样频率、光谱范围设定与信噪比无关; (3) 同样时间条件下, 长积分时间获得信噪比优于多次平均。通过优化这些参数, 在同等测量时间条件下实现了系统最优检测能力, 开展了变电站 SF₆ 微量泄漏巡检实验, 并发现一处泄漏点。通过测量

参数优化提升信噪比, 对于被动 FTIR 技术在气体泄漏检测、有毒有害气体遥测预警、大气温湿度廓线反演等应用具有重要意义。

References

- [1] Samer Sabbah, Peter Rusch, Joern-Hinnrich Gerhard, et al. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8743(17): 1.
- [2] David M Tratt, Kerry N Buckland, Jeffrey L Hall, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 154: 74.
- [3] Flanigan D F. *Applied Optics*, 1996, 35(30): 6090.
- [4] Mao J P, Kawa S R. *Applied Optics*, 2004, 43(4): 914.
- [5] Roland Harig. *Applied Optics*, 2004, 43(23): 4603.
- [6] WU Jun, CUI Fang-xiao, YUAN Xiao-chun, et al(吴 军, 崔方晓, 袁小春, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2019, 39(11): 3321.
- [7] Bernardo C, Griffith D W T. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2005, 95(2): 141.
- [8] Hase F, Blumenstock T, Paton-Walsh C. *Applied Optics*, 1999, 38(15): 3417.
- [9] Simon Turbide, Tracy Smithson. *Applied Optics*, 2010, 49(17): 3411.

Optimization of FTIR Passive Remote Sensing Signal-to-Noise Ratio and Its Application in SF₆ Leak Detection in Transform Substation

CUI Fang-xiao¹, ZHAO Yue², MA Feng-xiang², WU Jun^{1*}, WANG An-jing¹, LI Da-cheng¹, LI Yang-yu¹

1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Key Laboratory of General Optical Calibration and Characterization Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China
2. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230022, China

Abstract Passive FTIR infrared remote sensing technology is useful in gas leak detection. The detection limit of trace gas is related to the instrument's signal-to-noise ratio (SNR). The instrumental SNR is related to measurement parameters, such as spectral resolution, sampling frequency, integration time, and average times. How to optimize the combination of parameters to achieve the best signal-to-noise ratio in combination with actual applications currently lacks system analysis. This paper theoretically analyzes the relationship between these parameters and SNR and categorizes them into three aspects: (1) In terms of spectral resolution, the conclusion, cited from Roland Harig, is that SNR stays the same when the spectral resolution is lower than the full width at half maximum (FWHM), but in order to avoid interference of background gases, the resolution must avoid too low and is appropriately set in practical application; (2) In terms of the sampling frequency, sampling frequency reduction can reduce calculation cost and narrow the spectral range, but the sampling frequency and spectral range are not related with SNR; (3) In terms of integration time and multiple spectra averaging, under the same time conditions, multiple interferogram acquisitions will introduce a sampling error in zero path difference, making the noise larger than the theoretical calculation, so SNR obtained by long integration time is better than multiple averaging. Conducted sulfur hexafluoride (SF₆) leak detection experiment, the 4 cm⁻¹ resolution is selected according to SF₆ spectral feature, and 20 kHz sampling frequency is selected by taking into account SNR and detection time, and FTIR inspection system is used to locate the leakage point in the transform substation, which proves the effectiveness of this method.

Keywords FTIR; Passive remote sensing; Signal-to-noise ratio; SF₆

(Received May 6, 2020; accepted Aug. 21, 2020)

* Corresponding author