

文章编号: 1672-8785(2013)09-0029-05

## SF<sub>6</sub> 分解气体在线红外光谱 检测系统设计

兰 马<sup>1</sup> 贺正权<sup>2</sup> 董 明<sup>3</sup> 张敏睿<sup>2</sup> 杨彦博<sup>3</sup> 胡宝文<sup>2</sup> 屈恩世<sup>2</sup>

(1. 云南电网公司曲靖供电局修试所, 云南 曲靖 655000 ;

2. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119 ;

3. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘 要:** SF<sub>6</sub> 气体在放电或过热时会发生电离和分解, 产生多种气体分解物。这些分解物会影响电气设备的绝缘性能。但现有的红外气体检测手段均无法对 SF<sub>6</sub> 分解气体进行现场在线测量。根据实际需求, 本文根据光栅分光的原理设计了一种红外光谱检测系统。该系统可对 SF<sub>6</sub> 分解气体的成分和含量进行实时测量, 可在电气设备带电运行的状态下进行在线测量。测量数据为分析设备的性能和安全状况提供有力的依据。

**关键词:** SF<sub>6</sub> 气体; 气体分解物; 高压电气; 红外光栅; 光谱仪

**中图分类号:** TN741 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.09.06

## Design of an Infrared Spectrometer for On-line Monitoring of Decomposed SF<sub>6</sub> Gases

LAN Ma<sup>1</sup>, HE Zheng-quan<sup>2</sup>, DONG Ming<sup>3</sup>, ZHANG Min-rui<sup>2</sup>,

YANG Yan-bo<sup>3</sup>, HU Bao-wen<sup>2</sup>, QU En-shi<sup>2</sup>

(1. Qujing Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Corporation, Qujing 655000, China;

2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710119, China;

3. State Key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** SF<sub>6</sub> gas may be ionized or decomposed into a variety of gases when discharge or overheat occurs. These decomposed gases can affect the insulation of electric power equipment. However, all of the existing infrared gas detection means can not measure the decomposed SF<sub>6</sub> gas on line in situ. According to the practical needs, an infrared spectrometer system based on the principle of a grating is designed. The system can measure the components and contents of the decomposed SF<sub>6</sub> gas in real time and can operate on line when the electric equipment is in the running state. The measured data provide convincing gist for the analysis of the performance and safety of the electric equipment.

**Key words:** SF<sub>6</sub> gas; decomposed gas; high voltage equipment; infrared grating; spectrometer

收稿日期: 2013-07-01

基金项目: 国家自然科学基金 (61275086)

作者简介: 兰马 (1971-), 男, 浙江余杭人, 大学, 工程师, 主要研究方向为电力试验和检修。

E-mail: 13987462028@163.com

## 0 引言

SF<sub>6</sub> 是一种具有良好化学稳定性和绝缘性的气体, 作为绝缘介质已在多种电力设备中得到应用, 如高压断路器、变压器、互感器、接触器和熔断器等。目前, 在我国的电力系统中, SF<sub>6</sub> 气体绝缘组合电器 (Gas Insulated Switchgear, GIS) 已经被大量应用。随着我国输变电系统电压等级的不断提高, SF<sub>6</sub> 气体的应用会越来越广泛。

SF<sub>6</sub> 气体本身的化学性能非常稳定, 但在电力系统的运行中, 因大功率电弧、火花放电或电晕的作用, SF<sub>6</sub> 气体会产生电离和分解。目前, SF<sub>6</sub> 气体分解物的成分以及分解物与绝缘设备缺陷之间关系的分析已成为一个研究热点<sup>[1-3]</sup>。SF<sub>6</sub> 气体分解物是经过一系列复杂反应而后产生的, 主要分解气体有 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、SOF<sub>2</sub>、SOF<sub>4</sub>、S<sub>2</sub>OF<sub>10</sub>、SF<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>S、HF、CF<sub>4</sub> 等。其中 SF<sub>4</sub>、SOF<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 和 HF 等气体活性强, 非常不稳定。当它们和 H<sub>2</sub>O、O<sub>2</sub> 反应后, 会生成 SOF<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 和 HF 等<sup>[4]</sup>。因此, 对于 SF<sub>6</sub> 气体分解物的现场检测非常困难。目前, 对 SF<sub>6</sub> 电气设备的运行检查还没有相应的国家标准或行业标准。若能通过对 SF<sub>6</sub> 气体分解产物进行实时在线监测, 并结合电气设备实际运行情况进行分析, 则可探索出一套对 SF<sub>6</sub> 设备监督检查的方法和依据。通过实践验证, 可制订出相应的规范或标准, 为保障 SF<sub>6</sub> 电气设备的安全运行起到积极的作用。

要对 SF<sub>6</sub> 气体及其分解产物进行研究, 首先需要有对它们进行定量检测的手段。目前可用于检测 SF<sub>6</sub> 气体分解产物的方法主要有以下几种<sup>[5,6]</sup>: 化学法、电化学法、色谱质谱法和红外光谱法等。现有的检测方法有的检测灵敏度低, 有的价格昂贵, 体积庞大, 有的使用条件苛刻, 或者使用过程繁琐, 均无法实现对 SF<sub>6</sub> 设备的实时在线检测。因此其测量结果均不能准确客观反映设备内气体成分和变化的实际过程, 无法及时准确判断设备的运行状况和内部缺陷, 因而无法对设备进行故障诊断和报警。

红外分光光谱法是目前最先进的气体检测方法, 通过检测气体的吸收特性可检出被测气体成分及其浓度。该技术经过几十年的发展, 已经比较成熟, 在气体检测中得到广泛应用<sup>[7,8]</sup>。

红外光谱仪分为色散型和非色散型两类。色散型光谱仪利用分光元件 (如棱镜、光栅等) 进行分光, 利用分出的单色光进行测量, 如分光光度计。非色散型光谱仪没有色散元件, 是通过干涉调频进行分光的, 如傅里叶光谱仪。前者光谱分辨率较低, 但工作稳定可靠; 后者光谱分辨率高, 测量精度高, 但工作条件要求高, 价格昂贵。要实现 SF<sub>6</sub> 设备的在线检测, 需考虑测量现场的工作环境、室外气候条件和对被测设备的影响等多种因素。

分光型光谱仪采用光栅分光技术<sup>[9,10]</sup> 使远红外光源产生的宽谱光变成单色光, 然后使单色光透过被测气体。通过测定气体吸收峰值波长 (或波数) 及吸收强度, 便测得气体的成分和浓度。由于系统中动件比较少, 可以实现全固态化, 系统结构紧凑, 工作稳定, 可对 SF<sub>6</sub> 设备进行在线带电检测, 实时监测设备运行过程中气体成分的变化, 及时提供故障信息, 并可对故障进行预警。

## 1 系统设计

在线红外光谱检测系统主要包括红外光源、分光系统、气池和光电探测器等几个部分, 如图 1 所示。红外光源产生的光经过球面反射镜, 被会聚到分光系统的入射狭缝, 然后在分光系统中形成单色光, 单色光经出射狭缝后进入气池。气池内的不同气体会产生不同的吸收。光电探测器对光信号进行采集, 得到吸收曲线。根据曲线中吸收峰的位置及峰值大小, 即可测出气体的成分和浓度。

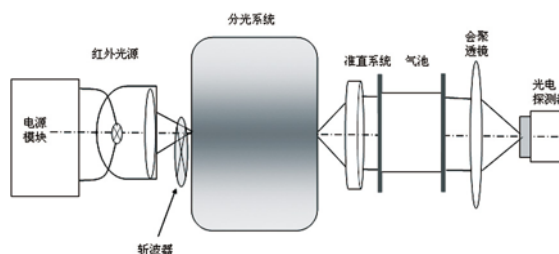


图 1 在线红外光谱检测系统的结构图

### 1.1 红外光源的选择

红外光谱仪中的红外光源必须具有辐射性能好、辐射强度大、体积小、操作方便和使用寿命长等特点。现在国内外各类红外分析仪器中常用的红外光源有能斯脱灯、硅碳棒、P-E光源和氮化硅陶瓷等。

能斯脱灯是由锆、钇、钽等稀土金属氧化物制成的棒状红外发射体。它具有负电阻效应, 室温下为绝缘体, 育温下变为导体。工作温度在 $1500^{\circ}\text{C}$ 左右, 最高可达 $1800^{\circ}\text{C}$ 。工作电流为 $0.25\text{ A}\sim 1\text{ A}$ , 使用波段为 $2.5\text{ }\mu\text{m}\sim 25\text{ }\mu\text{m}$ 。这种光源使用时需要预热, 在灯的两旁需加预热装置。所以, 在环境温度较低时启动困难。预热装置增加了光源体积, 而且使用寿命不稳定。

硅碳棒由SiC、C、Si、Al、Fe、 $\text{SiO}_2$ 、CaO、MgO等化学成分组成。这种光源的机械强度好, 但质地硬脆, 韧性差, 易折断、损坏。它的电阻率随温度呈非线性变化,  $800^{\circ}\text{C}$ 以下变化为负,  $800^{\circ}\text{C}$ 以上变化为正。使用波段也为 $2.5\text{ }\mu\text{m}\sim 25\text{ }\mu\text{m}$ , 工作温度可达 $3000^{\circ}\text{C}$ 。这种光源的最大特点是价格低、耐高温, 但需要的功率大, 使用时需要制冷装置。

P-E光源是美国Perkin-Elmer(P-E)公司制造的一种在红外仪器中广泛使用的光源。这种光源使用寿命比前两种光源的长, 而且输出光功率稳定。工作温度一般在 $800^{\circ}\text{C}\sim 1200^{\circ}\text{C}$ , 使用波段在 $2.5\text{ }\mu\text{m}\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ 。目前美国P-E公司生产的各种红外仪器几乎全部采用这种光源。但这种光源的进口价格高, 而且其发光区域不适合国产的一些仪器。

氮化硅陶瓷采用反应烧结法和热压烧结法生产而成。反应烧结法是将硅粉或硅粉与氮化硅粉的混合料按一般陶瓷制品生产方法成型, 然后将其放在氮化炉内在 $1150^{\circ}\text{C}\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 下预氮化; 获得一定强度后, 在机床上将其加工成型; 接着在 $1350^{\circ}\text{C}\sim 1450^{\circ}\text{C}$ 下使其进一步氮化, 直到全部变为氮化硅为止。这样制得的产品尺寸精确, 体积稳定。热压烧结法则是将氮化硅粉与少量添加剂(如MgO、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgF}_2$ 、 $\text{AlF}_3$ 或 $\text{Fe}_2\text{O}_3$

等)在 $19.6\text{ MPa}$ 以上的压力和 $1600^{\circ}\text{C}\sim 1700^{\circ}\text{C}$ 的条件下热压成型烧结。它硬度大, 熔点高, 化学性质稳定。这种光源无负阻效应, 不需要预热, 其安全使用温度可达 $1600^{\circ}\text{C}$ , 使用波段为 $0.76\text{ }\mu\text{m}\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ 。该光源具有启动快, 工作稳定, 体积小, 耗能少和寿命长等优点。

在线式光谱检测系统需要到现场工作, 系统所采用的红外光源必须具有启动快、工作电流小、不易氧化等特点。所以在该系统中采用了氮化硅光源, 光源尺寸为 $5\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ , 工作电流为 $2\text{ A}\sim 3\text{ A}$ , 工作温度在 $800^{\circ}\text{C}$ 左右。

### 1.2 分光系统

光栅分光系统是光谱仪的重要组成部分, 主要结构有<sup>[11]</sup>艾伯特-法斯提(Ebert-Fastie, E-F)、切尔尼-特纳(Czerny-Turner, C-T)和李特洛(Littrow)自准直系统。与艾伯特-法斯提和李特洛系统相比, 切尔尼-特纳系统采用多次反射, 系统结构更加紧凑, 适用于小型或便携式光谱仪系统。切尔尼-特纳系统用两块相同的小凹面反射镜作为准直镜和成像镜, 而不是用一块大的凹面反射镜。两个反射镜从中间分开, 曲率中心重合, 可避免二次衍射和多次衍射, 同时反射镜的加工和装调也变得更为简单了。该系统的结构如图2所示。

光栅采用表面镀金的金属反射式闪耀光栅, 其主要参数为: 闪耀波长为 $8000\text{ nm}$ , 光栅刻线数为 $75\text{ l/mm}$ , 光栅尺寸为 $68\text{ mm}\times 68\text{ mm}$ , 工作波长范围为 $4\text{ }\mu\text{m}\sim 17\text{ }\mu\text{m}$ 。

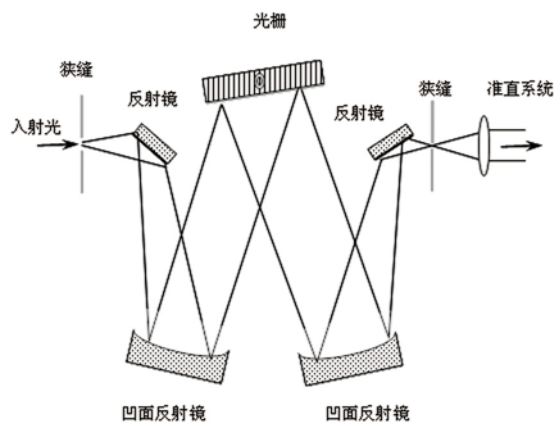


图2 光栅分光系统的结构

从入射狭缝进来的光经过反射镜和凹面反射镜反射形成平行光束, 光束入射到闪耀光栅上后发生衍射, 把不同波长的光分开。如果保持入射光的方向不变, 入射光经闪耀光栅产生的衍射光便经由出射狭缝射出。如果转动闪耀光栅, 不同波长的衍射光便会依次在狭缝中出现。所以, 通过移动狭缝或转动光栅, 就可以在任意时刻使只有特定波长的光从狭缝通过。从狭缝出射的光通过准直和会聚, 进入光电探测器, 探测器输出电压的高低反映出光强变化。结合光栅转动位置, 即可获得仪器工作光谱范围内的光谱曲线。

光栅衍射方程为

$$d(\sin \varphi + \sin \varphi') = m\lambda \quad (1)$$

式中,  $d$  为光栅常数,  $\varphi$  为入射角,  $\varphi'$  为衍射角,  $m$  为衍射级次,  $\lambda$  为光波长。

光栅的波长分辨率为

$$\Delta\lambda = \lambda/nN \quad (2)$$

式中,  $n$  为衍射级 (取  $n=1$ ),  $N$  为光栅条数。

在分光系统中, 经凹面反射镜反射后的平行光束被投射到光栅上, 其形成的光斑直径为 25 mm, 而光栅条数  $N=25 \times 75=1875$ 。因此, 光栅的最低分辨率为 (当  $\lambda=15 \text{ m}$  时)  $\Delta\lambda=15/1875=8 \text{ nm}$ 。

### 1.3 光电探测器

红外光电探测器分为光伏型和光导型两类。光伏型光电探测器的波长范围在  $0.5 \mu\text{m} \sim 5.5 \mu\text{m}$  之间, 截止波长通常为  $2.8 \mu\text{m}$ 、 $5.0 \mu\text{m}$  和  $5.5 \mu\text{m}$  等; 光导型光电探测器的波长范围在  $2 \mu\text{m} \sim 26 \mu\text{m}$  之间, 截止波长分别为  $5 \mu\text{m}$ 、 $12 \mu\text{m}$  和  $26 \mu\text{m}$  等。常用的红外探测器有碲镉汞探测器 (HgCdTe)、铟化铟探测器 (InSb)、硒化铅探测器 (PbSe)、硫化铅探测器 (PbS)、铟镓砷探测器 (InGaAs) 以及热释电探测器等几种。

HgCdTe 探测器为光导型探测器, 探测波长范围为  $2 \mu\text{m} \sim 16 \mu\text{m}$ 。InSb 探测器为光伏型, 光谱范围为  $1 \mu\text{m} \sim 5.5 \mu\text{m}$ 。这两种探测器均需

液氮制冷的状态下工作。PbSe 探测器为光导型探测器, 光谱探测范围为  $2 \mu\text{m} \sim 6 \mu\text{m}$ , 主要应用于气体检测、光学测温、火焰光度计等。PbS 探测器也为光导型, 光谱探测范围为  $1 \mu\text{m} \sim 3.5 \mu\text{m}$ , 主要应用于光学测温、湿度分析仪、医疗气体分析等。InGaAs 探测器工作在  $0.8 \mu\text{m} \sim 2.6 \mu\text{m}$  的波长范围内, 其响应时间快, 一致性好, 有极好的灵敏度及长时间工作稳定性。热释电红外探测器是一种宽谱光电探测器, 可以覆盖  $1.3 \mu\text{m} \sim 25 \mu\text{m}$  的红外谱段, 灵敏度高, 频率响应特性好, 被广泛应用于气体检测分析、FTIR 及光电计数等领域。

在我们的系统中, 考虑到工作波长范围, 整机体积要求及现场工作环境等, 选用美国 EOS 公司生产的 LT-020-H 热释电探测器。该探测器的响应灵敏度高, 工作波长范围宽, 可在常温下工作。其主要参数为: 工作波长为  $2 \mu\text{m} \sim 16 \mu\text{m}$ , 响应度为  $10^5 \text{ V/W}$ ,  $\text{NEP} < 10^{-9}$ 。热释电探测器需要在动态光照条件下才能工作。在系统中, 通过斩波器对光源光进行调制, 调制频率为 22 Hz。

## 2 测试实验

利用我们研制的在线红外光谱检测系统对  $\text{SO}_2$  和  $\text{CF}_4$  两种气体进行了测定。两种气体样本由中国计量科学研究院提供, 以  $\text{SF}_6$  为基础气体。 $\text{SO}_2$  气体的浓度为 3000 ppm, 生产日期为 2013 年 1 月 5 日。 $\text{CF}_4$  气体的浓度为 500 ppm, 生产日期为 2012 年 8 月 22 日, 有效期均为 1 年。

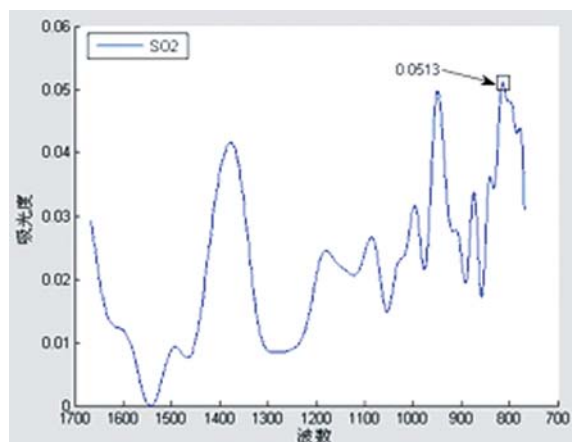
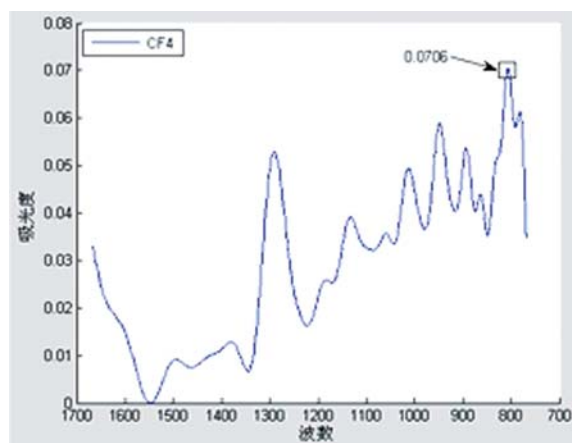
测试环境条件为: 温度为  $21^\circ\text{C}$ , 湿度为 30% HR, 大气压为 99 kPa, 被测气体的压力为 0.1 MPa。

测试时, 先连接检查系统的气池和样气瓶, 然后打开检测系统的气池气阀, 再打开样气气瓶的气阀, 将气体压力从小到大调至 0.1 MPa, 5 min 后, 启动系统测试软件进行数据采集, 大约 15 min 后, 完成一次采集。图 3 为  $\text{SO}_2$  和  $\text{CF}_4$  两种气体的光谱吸光度曲线。

从图 3 可看出,  $\text{SO}_2$  气体分别在  $1380 \text{ cm}^{-1}$ 、 $1170 \text{ cm}^{-1}$ 、 $1080 \text{ cm}^{-1}$ 、 $990 \text{ cm}^{-1}$ 、 $920 \text{ cm}^{-1}$  及  $800 \text{ cm}^{-1}$  等处有吸收峰;  $\text{CF}_4$  气体分别在 1290



$\text{cm}^{-1}$ 、 $1108\text{ cm}^{-1}$ 、 $1000\text{ cm}^{-1}$ 、 $930\text{ cm}^{-1}$ 、 $870\text{ cm}^{-1}$  及  $780\text{ cm}^{-1}$  等处有吸收峰。由于我们系统中使用的气池长度比较短 (10 cm), 所以光谱分辨率比较低。通过用信噪比算法分别计算两种气体吸收曲线的噪声均方差  $\sigma$ , 即  $\sigma(\text{SO}_2)=0.00389$ ,  $\sigma(\text{CF}_4)=0.00923$ , 两种气体的最大吸收峰值分别为 0.0513 和 0.0706。因此, 其信噪比分别为  $\text{SNR}(\text{SO}_2)=0.0513/0.00389=13.19$  和  $\text{SNR}(\text{CF}_4)=0.0706/0.00923=7.65$ , 然后将两种气体的浓度与信噪比相除, 即可得出仪器对两种气体的检出限:  $\varphi(\text{SO}_2)=3000\text{ ppm}/13.19=227.45\text{ ppm}$  和  $\varphi(\text{CF}_4)=500\text{ ppm}/7.65=65.36\text{ ppm}$ 。

(a)  $\text{SO}_2$ (b)  $\text{CF}_4$ 图3  $\text{SO}_2$  和  $\text{CF}_4$  的光谱曲线

### 3 分析及结论

本文设计了一种基于光栅分光原理的  $\text{SF}_6$  气体分解物红外光谱检测系统。该系统结构紧凑, 操作方便, 适合于  $\text{SF}_6$  设备的在线检测。由 <http://journal.sitp.ac.cn/hw>

于系统中采用的气池为单光程结构, 光程短, 检测精度低, 目前能达到的检出精度为几十到几百 ppm。通过增加气池光程长度, 可以使仪器检测精度大大提高。  $\text{SF}_6$  分解物均有多个吸收峰, 而且有些气体的吸收峰会发生重叠, 出现“多对多”的情况, 即一种气体有多个吸收峰, 而一个吸收峰有时又会与多种气体有关。所以, 要准确判定混合气体中的气体成分, 需要对多个峰值的位置进行综合考虑。

为了扩大光谱仪的检测波长范围, 可以采用双光束结构, 并将工作波长范围扩展为  $2\text{ }\mu\text{m}\sim 25\text{ }\mu\text{m}$ 。另外, 在光路中增加参考光路, 可以有效地消除因光源不稳定所带来的误差。

作为现场在线式仪器, 还需要考虑仪器的现场绝缘措施, 以避免高电压对仪器的影响。  $\text{SF}_6$  设备中气室的压力比较大, 需要用减压机构控制进入气池的气体压力, 以免压力过大。另外, 还要考虑气路的密封性和气体的回收处理。

### 参考文献

- [1] 骆立实, 姚文军, 王军, 等. 用于 GIS 局部放电诊断的  $\text{SF}_6$  分解气体研究 [J]. 电网技术, 2010, 34(5): 225-230.
- [2] 张晓星, 姚尧, 唐炬, 等.  $\text{SF}_6$  放电分解气体组分分析的现状和发展 [J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 664-669.
- [3] 卢立秋, 郭军科, 张桂贤, 等. 放电故障的  $\text{SF}_6$  设备分解产物总量分析 [J]. 华北电力技术, 2007, Z1:150-152.
- [4] 姚明, 余钟民, 徐红, 等.  $\text{SF}_6$  分解物稳定性分析及其检测技术探讨 [J]. 华东电力, 2011, 39(3):482-485.
- [5] 程伟, 苏镇西, 祁炯, 等.  $\text{SF}_6$  分解物检测方法的比较及应用 [J]. 华东电力, 2011, 39(11):1179-1181.
- [6] 陈晓清, 彭华东, 任明, 等.  $\text{SF}_6$  气体分解产物检测技术及应用情况 [J]. 高压电器, 2010, 46(10):81-89.
- [7] 黄书华, 孙友文, 刘文清, 等. 基于非分散红外光谱吸收法的  $\text{SO}_2$  检测系统研究 [J]. 红外, 2011, 32(12): 10-13.
- [8] 张晓星, 任江波, 李毅, 等.  $\text{SF}_6$  分解组分的红外光谱定量测定 [J]. 高电压技术, 2010, 36(3):584-589.
- [9] 李华, 邢廷文, 马文礼. 一种以光栅作为分光元件的远红外光谱仪 [J]. 光电工程, 2002, 29(3):43-46.
- [10] 张发国, 俞洪麟. 闪耀光栅原理及其应用 [J]. 重庆文理学院学报 (自然科学版), 2008, 27(1):48-51.
- [11] 李扬裕, 方勇华, 刘洋. 小型长波红外光栅光谱仪光学设计 [J]. 大气与环境光学学报, 2012, 7(4):315-320.