

doi: 10.3788/gzxb20144302.0228002

基于经验模态分解的 SO₂ 浓度检测信号处理方法

王书涛, 李梅梅, 李盼, 刘铭华, 王丽媛, 曾秋菊

(燕山大学 电气工程学院; 河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 荧光法测量 SO₂ 浓度是大气监测中常用的检测手段. 双光路技术可以消除光源和光路的噪音干扰, 但光电转换器件在激发光照射下产生的背景噪音也会影响定量分析的准确度. 本文采用经验模态分解滤波算法降低检测中存在的各种噪音, 在实现有效降噪的基础上较好地保存了有用的原始信号. 仿真结果表明, 针对 SO₂ 浓度检测系统, 利用经验模态分解去噪后信号的信噪比达到 204.273 6, 均方误差为 0.007 0. 与小波去噪法相比, 经验模态分解检测效果更佳. 最后将经两组不同方法处理后的信号应用于气体检测系统中, 实验数据的线性关系更好地验证了经验模态分解方法应用到浓度检测系统的可行性.

关键词: SO₂ 浓度检测; 经验模态分解; 小波分析; 信噪比; 均方误差

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)02-0228002-6

Signal Processing Method Based on Empirical Mode Decomposition in the SO₂ Concentration Monitoring

WANG Shu-tao, LI Mei-mei, LI Pan, LIU Ming-hua, WANG Li-yuan, ZENG Qiu-ju

(Institute of Electrical Engineering; Measurement Technology and Instrumentation Key Lab of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: The fluorescent spectrometry is a common method to detect the concentration of SO₂ in the atmospheric monitoring. The detection system adopting double light paths can eliminate the noise jamming from the light source and light path. However, background noise produced by photoelectric converting device under the laser irradiation will also affect the accuracy of quantitative analysis. Empirical Mode Decomposition (EMD) filtering algorithm was used to reduce various kinds of noise existing in the detection, which could retain the useful original signal and reduce the noise effectively. The simulation results show that for the sulfur dioxide concentration detection system, using EMD de-noising, the Signal Noise Ratio (SNR) increases to 204.273 6, and the Mean Squared Error (MSE) is 0.007 0. Compared with the wavelet de-noising method, the effect of EMD detection is much better. Finally, the signal processed with the two signal methods were applied to the gas detection system. From the experimental data of the linear relationship, it can be concluded that the EMD method applied to the proposed concentration detection system is feasible.

Key words: SO₂ concentration monitoring; Empirical Mode Decomposition (EMD); Wavelet; Signal Noise Ratio (SNR); Mean Squared Error (MSE)

OCIS Codes: 280.1120; 230.0040; 110.7410; 070.1060

0 引言

空气污染是人类持续发展所面临的不变主题^[1]. 研究实时、高准确度的检测和处理设备是一项长期任

务. SO₂ 是大气中主要污染物之一, 也是衡量大气是否遭到污染的重要标志^[2]. 目前, 国内外对 SO₂ 的监测主要包括电位电解法、自动滴定碘量法^[3]、溶液电导率法、分光光度法、非分散红外吸收法^[4]、紫外吸收法^[5],

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61201110)资助

第一作者: 王书涛(1978—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光子晶体光纤、弱信号检测和环境多参量检测. Email: wangshu_tao@163.net

通讯作者: 李梅梅(1988—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光子晶体光纤、弱信号检测和环境多参量检测. Email: 240844165@qq.com

收稿日期: 2013-07-03; 录用日期: 2013-09-17

<http://www.photon.ac.cn>

紫外荧光法^[6]等.其中,紫外荧光法以其响应速率快,灵敏度高,不需取样和能够实时监测的优点倍受国际上科学工作者的青睐^[7].其原理是当 SO_2 气体被激发光激发后产生荧光,通过荧光强度与 SO_2 浓度之间的线性关系定量分析气体浓度.

在污染气体 SO_2 检测系统的光电转化部分,为了达到更高的准确度,通常采用光电倍增管进行电信号的转化,但是转化过程中,仪器本身产生的一些噪音(散粒噪音、热噪音、 $1/f$ 噪音等)^[8]会将微弱信号淹没,很难提取出有用信号,影响定量分析的准确度.针对该类问题,目前常采用小波变换、傅里叶分析^[9]等方法,但是以上非自适应性的方法,在处理非线性的信号时存在局限性^[10].相比于以上方法,本文采用的经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)法突破了依靠先验经验的传统方式,去噪后的信号更加直观、准确性更高.

1 EMD 原理

EMD 是基于放大信号的局部特征对信号进行分解的方法,通过对关键部位数据的放大,突出了数据的原始特征信息^[11].EMD 分解后得到各个本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)分量对应的高低频信息,从中可以有效提取出微弱有用信号,达到去噪目的.

EMD 分解的核心是获得 IMF,而 IMF 必须满足两个条件^[12]:1)任一数据其极值点与所有过零点的个数最多相差一个;2)任意点上下包络线的均值为零.

从满足的条件可知,IMF 一个周期内只可有一个波动模态,并且在反映信号内部波动性的同时能够体现信号局部特性.

EMD 对信号进行降噪,主要包含两层嵌套:

1)找出信号 $X(t)$ 的所有局部极值点,拟合出上下包络线.

2)计算包络线的均值 m ,并从原信号 $X(t)$ 中筛除均值 m ,得到序列 $Y_1(t)$

$$Y_1(t) = X(t) - m \quad (1)$$

3)判断 $Y_1(t)$ 是否是 IMF,若满足 IMF 条件,则令 $Y_1(t) = g_1(t)$, $g_1(t)$ 为原信号的第一个 IMF,代表最高频率分量;若不满足 IMF 条件,将 $Y_1(t)$ 看做新的 $X(t)$,重复上述操作 $g_{1i}(t) = g_{1(i-1)}(t) - m_{1i}$,直到最终筛分得到符合 IMF 的条件.令每个 IMF 分量为 $c_i(t)$,为了使筛出的 IMF 分量的幅值和频率同时有意义,用相邻两个筛出分量的标准差 SD 作为筛分的终止条件,当运算结果小于预定值(0.2~0.3)时,筛分终止,从而对筛分次数进行限制.

$$SD = \frac{\sum_{t=0}^N |g_{1(i-1)}(t) - g_{1i}(t)|^2}{\sum_{t=0}^N g_{1i}^2(t)} \quad (2)$$

4)在原信号 $X(t)$ 中剔除 $c_1(t)$,得新信号,即

$$r_1(t) = X(t) - c_1(t) \quad (3)$$

5)重复上述操作,最终将 $X(t)$ 分离成一个单调函数 $r_n(t)$ 和 n 个 IMF 分量,即

$$X(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (4)$$

计算可知,EMD 的宗旨是将原信号分解为 IMF 分量和一个表征信号平均趋势的剩余量,其流程如图 1.

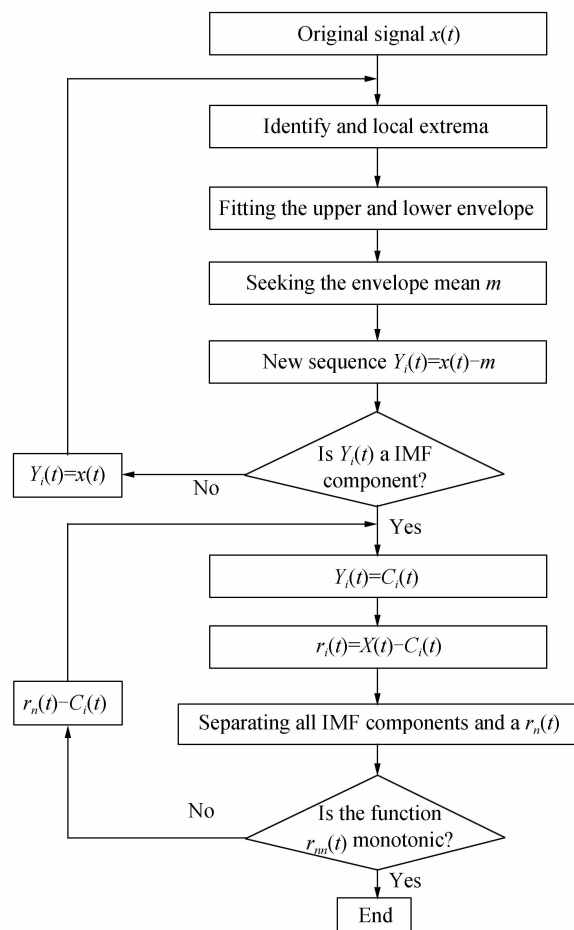


图 1 EMD 算法流程

Fig. 1 The flow of the EMD algorithm

2 检测原理与系统

图 2 是利用双光束紫外分光光度计测得的 SO_2 吸收谱.由图可知, SO_2 在 190~230 nm 和 250~310 nm 两个波长区间上有较强的吸收峰.但是,在 250~310 nm 范围内, N_2 、 O_2 和水蒸气等会使产生的荧光发生淬灭.由于光源的强度影响测试的灵敏度,而光源的稳定性又直接影响测试的重复性与精确度.因此,光源的选择对测试结果起决定作用.本文采用瞬时功

率强、光谱性能好、平均功率低、背景光较小的氙灯 (190~700 nm)作为激发光源^[13],光源波长选择在 190~230 nm区间.由实验得知,该光源周围空气中 NO 和 CO₂ 等干扰气体对测量结果的影响较小.

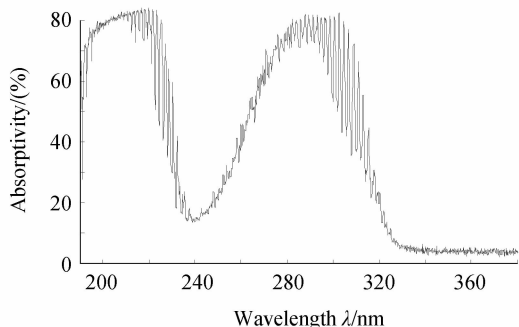


图 2 SO₂ 吸收谱

Fig. 2 SO₂ absorption spectrum

由荧光法定量检测 SO₂ 的理论可知,光电倍增管 (PhotoMultiplier Tube, PMT)接收的荧光强度 I_f 可表示为

$$I_f = \varphi I_a = \frac{\epsilon c l K_f I_0}{K_f + K_d + K_{q[M]}} = Kc \quad (5)$$

式中, φ 为荧光效率; I_a 为吸收光强; l 为气室尺寸; K_f 为发射速率常量; I_0 为入射光强; ϵ 为摩尔吸光系数; K_d 为淬灭速率常量; $K_{q[M]}$ 为M气体离解速率常量.

当式(5)中气室尺寸一定,各速率常量为已知时,荧光强度与气体浓度成正比.

图 3 为荧光式 SO₂ 检测系统.为了去除水蒸气的干扰,首先将样品池烘干,再将待测气体配气后送入样品器皿.实验中,光源发出的光通过凹面镜反射后,经过滤光片滤去杂散光,再经聚光镜使之会聚更多的激发光后通入气室,透过样品器皿的光源散射光经石英透镜被 PMT₁ 收集,同时,由凹面镜反射的微弱荧光信号经过对紫外光吸收很弱的石英透镜和能够阻拦一级衍射光谱的滤光片后被 PMT₂ 收集,对两个 PMT 输出的电流信号进行信号处理,其中 PMT₁ 收集到的是光路透射信号 I_0 ,可用作对比信号,在光源波动的条件

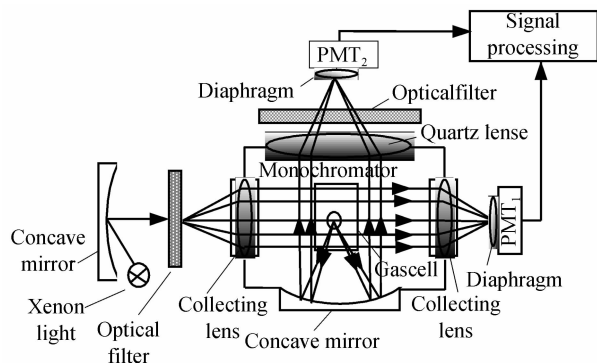


图 3 荧光式 SO₂ 检测系统

Fig. 3 Fluorescence SO₂ detection system structure

下, PMT₁ 检测到的荧光强度与浓度之间是否成线性关系,从而用来衡量光源的波动强度^[14],将 I_1 和 I_0 做比,即 I_1/I_0 ,很好的消除了光路中的光源波动,从而提高系统检测准确度.最终对测试结果进行实时修正.通过荧光强度与气体浓度的线性关系从而检测气体的浓度.

3 实验与分析

图 4 为同种浓度下光电倍增管接收到的 0.1 s 内的荧光强度与时间信号.由于 SO₂ 在低浓度时产生的荧光信号比较微弱,而 PMT 等光电元件本身也会产生一些噪音,因此,荧光信号被噪音淹没,从而影响测试的准确度.

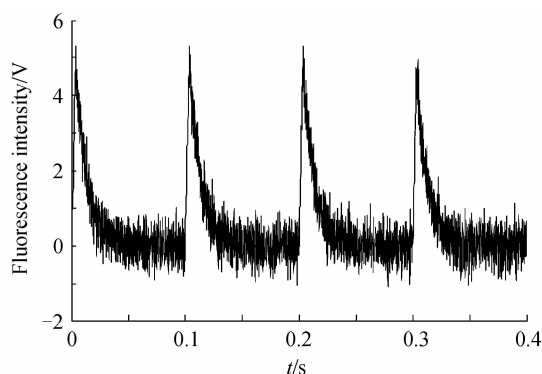
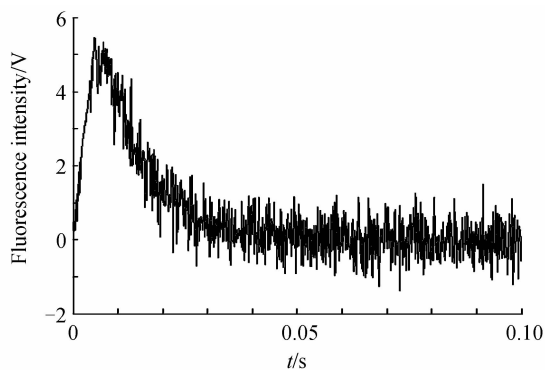


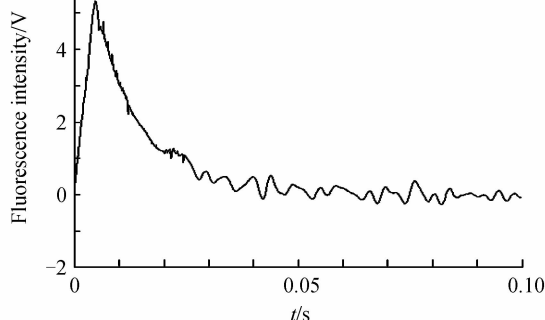
图 4 光电倍增管接收信号

Fig. 4 Received signal by photomultiplier tubes

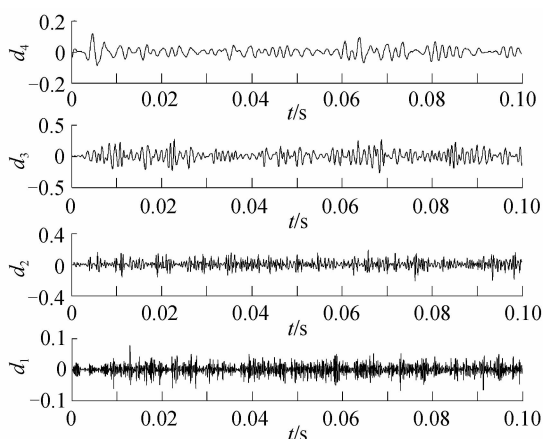
首先,基于小波理论,利用 dB10 阶小波将信号进行四层分解.先抽取噪音信号的近似系数和细节系数,再进行信号重构.仿真结果如图 5.其中,图 5(a)为含



(a) The fluorescence intensity with noise



(b) The fluorescence spectrum after reconstruction



(c) The component of EMD

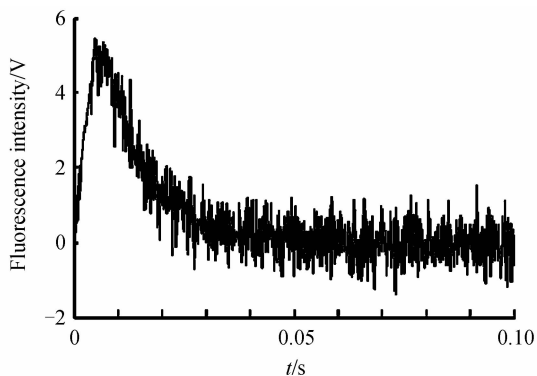
图 5 小波分解过程

Fig. 5 Wavelet decomposition process

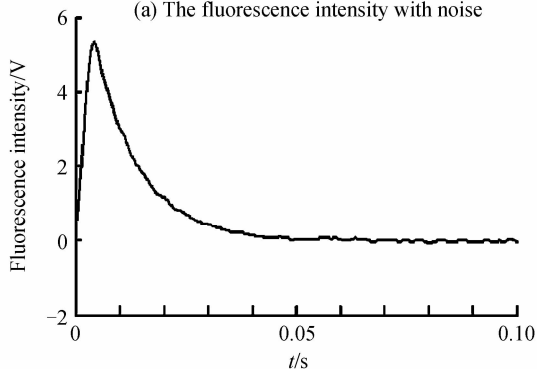
噪声的单周期荧光信号,图 5(c)是小波变换的细节分量,其中包含噪声和荧光信号的高频成分.图 5(b)是阈值处理后重构的荧光谱图.

利用 EMD 对含噪的荧光信号进行多重分解,分解得到的 IMF 分量对应着微弱信号成分,分解过程如图 6.

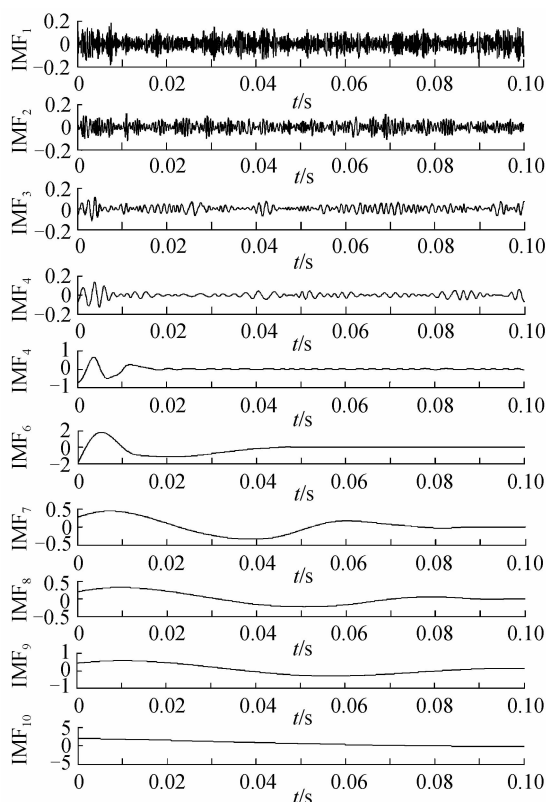
从 EMD 分解结果不难看出,去除高频成分后的重构信号很好的表达了荧光信号的真实数据.与小波算法相比,去噪效果更为平滑.为了更加准确地表达两种算法的滤波效果,采用信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)和均方误差(Mean Squared Error, MSE)进行评



(a) The fluorescence intensity with noise



(b) The fluorescence spectrum after reconstruction



(c) The component of EMD

图 6 EMD 分解过程

Fig. 6 EMD decomposition process

定,计算式为

$$SNR = 10 \times \lg s/n = 10 \times \lg \frac{\sum_{i=1}^N y_i^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (6)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2 \quad (7)$$

式中, N 为采样点数; y_i 为 i 时刻降噪后的信号; x_i 为 i 时刻包含噪声的原始信号.

将两种信号处理方法得到的信号分别应用到系统中,在相同时间点处测得五组检测浓度下两种方法的检测浓度实验,得到浓度值如表 1.

由仿真计算可知,在两种去噪方法后的 SO_2 浓度与荧光强度的线性拟合中,EMD 的线性更好,而

表 1 不同浓度两种方法荧光强度

Table 1 The fluorescence intensity with two methods under different concentrations

Sample	Concentration (PPM)	Fluorescence intensity of wave/V	Fluorescence intensity of EMD/V
1	20.00	0.215 1	0.237 0
2	40.00	0.371 6	0.382 2
3	100.00	0.756 3	0.815 2
4	150.00	1.028 9	1.178 5
5	200.00	1.401 1	1.542 6

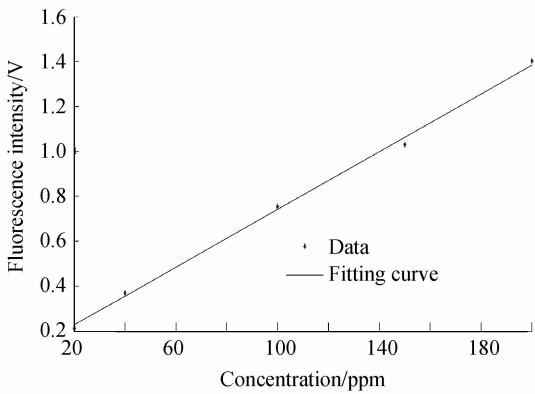


图7 小波去噪后 SO₂ 浓度与荧光强度关系

Fig. 7 The relationship of the concentration of SO₂ and fluorescence intensity after the wavelet denoising

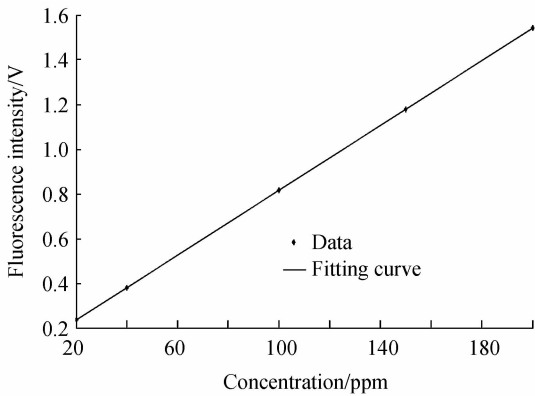


图8 EMD 去噪后 SO₂ 浓度与荧光强度关系

Fig. 8 The relationship of the concentration of SO₂ and fluorescence intensity after the EMD

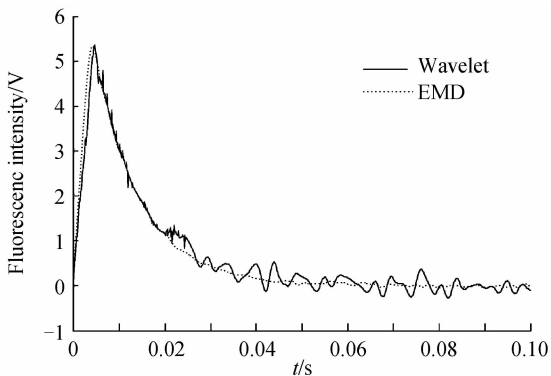


图9 两种算法去噪后效果比较

Fig. 9 Comparison of two methods for denoising effect

且在图像仿真计算经小波变换后的信噪比为 177.334 1, 均方误差为 0.222 8; 而用 EMD 进行降噪后的信噪比为 204.273 6, 均方误差为 0.007 0. 显而易见, 通过两方面的比较, 在验证算法更有优势的前提下也验证了系统的准确度, 最终得出采用 EMD 降噪方法具有更好效果.

4 结论

本文将 EMD 技术应用到荧光法检测 SO₂ 浓度的

信号去噪中, 由于光电倍增管检测到的信号中噪音信号往往会淹没微弱的荧光信号, 使得有用信号无法体现, 而采用 EMD 分解得到的 IMF 分量恰对应着弱信号成分, 因此很好地克服了一些方法难以分析微弱信号的不足. 仿真实验结果表明, 采用 EMD 去噪效果更加明显, 信噪比更高, 进而使传感系统的准确度大大提高. 通过 SO₂ 监测系统实验更好地验证了 EMD 算法的可行性.

参考文献

- [1] ZHENG Hai-ming, JIN Wei-jia. Effects of temperature on the ultraviolet absorption characteristics of SO₂ [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, **33**(3): 776-779.
郑海明, 靳伟佳. 温度对 SO₂ 紫外吸收特性的影响 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, **33**(3): 776-779.
- [2] SUN You-wen, LIU Wen-qing, XIE Pin-hua, et al. Measurement of industrial gas pollutant emissions using differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(1): 010701-1-10.
孙友文, 刘文清, 谢品华, 等. 差分吸收光谱技术在工业污染源烟气排放监测中的应用 [J]. *物理学报*, 2013, **62**(1): 010701-1-10.
- [3] WEN Wei-li, HUANG Ji-min. The contrast of Iodine quantity method and non-dispersive infrared absorption method to determinate SO₂ concentration [J]. *Environmental Study and Monitoring*, 2009, **22**(3): 51-53.
温维丽, 黄济民. 碘量法与非分散红外吸收法测定 SO₂ 浓度的对比 [J]. *环境研究与监测*, 2009, **22**(3): 51-53.
- [4] SUN You-wen, LIU Wen-qing, WANG Shi-mei, et al. Research on the method of interference correction for nondispersive infrared multi-component gas analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(10): 2719-2724.
孙友文, 刘文清, 江世美, 等. NDIR 多组分气体分析的干扰修正方法研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(10): 2719-2724.
- [5] WEIBRING P, EDNERH, SVANBERG S, et al. Monitoring of volcanic sulfur dioxide emissions using differential absorption lidar, differential optical absorption spectroscopy and correlation spectroscopy [J]. *Applied Physics B*, 1998, **67**(4): 419-426.
- [6] QIU Jian, YANG Guan-ling, HE Zhen-jiang, et al. Atmospheric SO₂ concentration analyzer based on ultra-violet fluorescence [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, **29**(1): 174-178.
邱健, 杨冠玲, 何振江, 等. 基于紫外荧光法的大气 SO₂ 气体浓度分析仪 [J]. *仪器仪表学报*, 2008, **29**(1): 174-178.
- [7] XIONG Jian-wen, YANG Chu-ping, HE Zhen-jiang. Experimental studies on ultra-violet fluorescence detection of sulfur dioxide by multi-wavelength excitation [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2002, **13**(8): 822-824.
熊建文, 杨初平, 何振江. 多波长紫外荧光 SO₂ 测实验研究 [J]. *光电子激光*, 2002, **13**(8): 822-824.
- [8] GUO Cong-liang, SUN Jin-jun, FANG Rong-chuan, et al. Noise analysis and modeling of photo-multiplier [J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(5): 636-640.
郭从良, 孙金军, 方容川, 等. 光电倍增管的噪音分析和建模 [J]. *光学技术*, 2003, **29**(5): 636-640.
- [9] BIAN Hai-long, CHEN Guang-fu. Anti-aliasing algorithm of nonstationary harmonic signal measurement based on

- interpolation in frequency domain using short time Fourier transform[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, **29**(2): 284-288.
- 边海龙, 陈光福. 基于短时傅里叶变换检测非平稳信号的频域内插优化抗混叠算法[J]. *仪器仪表学报*, 2008, **29**(2): 284-288.
- [10] ZHAO Xiao-min, TEJAS H P. Multivariate EMD and full spectrum based condition monitoring for rotating machinery [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, **27**(1): 712-728.
- [11] XIA Jun-zhong, SU Tao, MA Zong-po, *et al.* Fault feature extraction methods of ball bearings based on EMD[J]. *Noise and Vibration Control*, 2012(2): 123-127.
- 夏均忠, 苏涛, 马宗坡, 等. 基于EMD的滚动轴承故障特征提取方法[J]. *噪声与振动控制*, 2012(2): 123-127.
- [12] ZHOU Zhen-yu, YANG Hong-yu, GONG Hui, *et al.* Brain signal analysis of functional near-infrared imaging based on Hilbert-Huang transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 307-312.
- 周振宇, 杨宏宇, 龚辉, 等. 基于希尔伯特-黄变换的近红外脑功能成像信号分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 307-312.
- [13] CHAI Yi, SHI Wei-ren, LIAO Chuan-jin, *et al.* Real-time measuring the instant discharging characteristic of pulse xenon lumps[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, **25**(3): 392-394.
- 柴毅, 石为人, 廖传锦, 等. 脉冲氙灯瞬态在线检测系统[J]. *仪器仪表学报*, 2004, **25**(3): 392-394.
- [14] TANG Yuan-he, LIU Han-chen, MA Qi, *et al.* Confirming the incidence intensity by the discriminating scatter light of bubble interface in water[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2007, **3**(1): 43-46.
- 唐远河, 刘汉臣, 马琦, 等. 由水中气泡界面识别的散射光判定入射光强[J]. *西安理工大学学报*, 2007, **3**(1): 43-46.