

中红外甲烷检测仪稳定性实验及温度补偿研究

叶玮琳¹ 郑传涛² 王一丁²

¹ 汕头大学工学院, 广东 汕头 515063

² 吉林大学电子科学与工程学院集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林 长春 130012

摘要 利用甲烷分子在中红外 3.31 μm 波段的吸收特性,设计并研制了一种便携式甲烷检测仪。为了研究仪器的稳定性,对其在体积分数为 0×10^{-6} 气体下的输出电压信号做了长时间测试,结果显示,由于环境温度发生变化,半导体电子元件和光学元件参数以及甲烷分子吸收系数均发生漂移,使检测仪输出电压信号的相对漂移达 1%。为了抑制温度变化对仪器检测性能的影响,进一步实验研究了仪器输出电压随温度的变化关系,并根据这一关系,对温度漂移造成的信号偏差进行了补偿。引入温度补偿后的实验结果显示,针对体积分数为 0×10^{-6} 的样品气体,仪器输出电压每周相对波动从 1% 降至 0.46%,体积分数波动范围从 86×10^{-6} 降至 37×10^{-6} 。针对体积分数为 3250×10^{-6} 的样品气体,计算了仪器的阿伦方差曲线,当采样时间大于 500 s 时,阿伦方差几乎趋于定值,其标准差小于 10×10^{-6} 。因此,通过温度补偿,在一定程度上消除了环境温度的影响,从而改善了仪器的稳定性。

关键词 光电子学;红外技术与应用;甲烷检测;温度补偿;仪器稳定性

中图分类号 TH83 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0323003

Stability Measurement and Temperature Compensation of Mid-Infrared Methane Detection Device

Ye Weilin¹ Zheng Chuantao² Wang Yiding²

¹ College of Engineering, Shantou University, Shantou, Guangdong 515063, China

² State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract Using the mid-infrared absorption property of methane molecular at 3.31 μm , a portable methane detector is designed and developed. Long-term measurement on the output voltage is performed under the sample gas with volume fraction of 0×10^{-6} to study the device's stability. The results show that, because of environmental temperature change, semiconductor electronic components' parameters, optical components parameters, and methane molecular absorption coefficients all drift. To suppress the effect of temperature change on detection performances, the relationship between the output sensing voltage and ambient temperature is studied experimentally, and voltage shift caused by temperature drift is compensated. Experimental results after temperature compensation show that, the variation range of output sensing voltage can be reduced weekly from 1% to 0.46% under the sample gas with volume fraction of 0×10^{-6} , and the gas volume fraction value can be dropped from 86×10^{-6} to 37×10^{-6} . The Allan variance of the detection device is also plotted for the sample gas with volume fraction of 3250×10^{-6} . The Allan variance value almost tends to be a constant when the sampling period is longer than 500 s, and the standard deviation value is less than 10×10^{-6} . Therefore, by virtue of temperature compensation, the effect of environmental temperature change can be well eliminated, and the instrument's stability can thus be improved.

Key words optoelectronics; infrared technique and application; methane detection; temperature compensation; instrument stability

OCIS codes 260.3060; 220.4830; 040.3060

收稿日期: 2013-10-23; **收到修改稿日期:** 2013-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(61307124, 61077074)、国家科技支撑计划项目(2013BAK06B04)、广东省教育厅研项目(2013LYM_0030)、吉林省科技发展计划项目(20120707, 201101036)、长春市国际合作项目(11GH01)、汕头大学科研启动基金(NTF12022)、汕头大学青年科研基金(YR12005)

作者简介: 叶玮琳(1984—),女,博士,讲师,主要从事红外气体传感器方面的研究。E-mail: wlye@stu.edu.cn

1 引 言

近年来,红外光谱吸收技术由于其探测范围广、灵敏度高、选择性好、寿命长、响应速度快等优点,已广泛应用于煤矿环境中易燃易爆气体检测以及大气环境中污染气体检测,如甲烷(CH_4)、一氧化碳(CO)、硫化氢(H_2S)和氯化氢(HCl)等^[1-5]。 CH_4 是造成煤矿爆炸的主要因素之一,及时、有效并准确地检测出煤矿下甲烷浓度,是预防矿难的主要措施。因此,人们在该方面的研究呈逐年上升趋势^[6-10]。近10年来,本课题组在该领域也开展了大量的研究工作,先后利用热光源、分布反馈激光器、量子级联激光器、红外发光二极管等研制并报道了多种 CH_4 检测仪^[11-13]。尽管如此,仪器的稳定性、可靠性以及寿命仍然是煤矿恶劣环境下亟待解决的问题。

一方面,根据气体分子吸收特性,其吸收系数与温度有关,即当温度变化时该值将发生明显变化,若不补偿则将导致仪器失准。另一方面,电子元器件、光学元件等均会因温度而变化,使得检测结果随温度发生波动,易导致仪器稳定性较差。因此,需要对仪器进行温度补偿以提高其稳定性和可靠性。本文给出了所研制的中红外瓦斯检测仪的结构,并实验研究了其在未做温度补偿时的稳定性。给出了对仪器进行温度补偿的原理和相关公式,测得了电压传感信号与检测仪工作温度的关系,最终得到了温度补偿后的气体浓度-电压关系公式。在引入温度补偿的情况下,开展了仪器稳定性测量实验,并测量了其阿伦(Allan)方差曲线。

2 甲烷检测仪及稳定性测试

2.1 检测结构

基于单光源、双波长探测原理的中红外甲烷检测系统结构如图1(a)所示,它由电学和光学两部分构成。图1(a)上侧为集成了信号采集、数据处理、操作控制和信息显示的主控制室;下侧为气室,包含了非对称椭球聚光镜和吸收气室(ALCGC),中红外(MIR)光源(IRL715)和一个双通道探测器(TPS2534,两探测窗口的波长分别为 $\lambda_1 = 3.31 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 3.90 \mu\text{m}$)。

设计中,采用 ARM7 处理器(飞利浦, LPC2136)作为主控制器;采用恒流模块输出的4 Hz方波调制 MIR 光源(LSM);数码管显示器(LED)作为浓度显示模块。系统包含两个通道,对于信号通道,从光源发出的 $3.31 \mu\text{m}$ 光线被一定浓度的甲

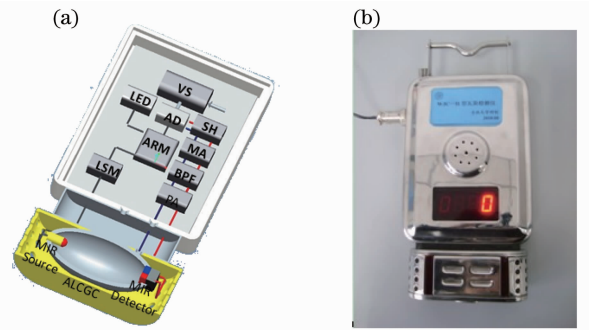


图1 (a)系统结构框图;(b)甲烷检测仪实物照片
Fig. 1 (a) System block diagram; (b) photo of the CH_4 detection device

烷吸收后,到达 $3.31 \mu\text{m}$ 探测器窗口后转化为测量电压信号 $u_t(\lambda_1)$;对于参考通道,从光源发出的 $3.90 \mu\text{m}$ 光线不被甲烷吸收,到达 $3.90 \mu\text{m}$ 探测器窗口后转化为参考电压信号 $u_r(\lambda_2)$ 。这两路模拟信号均通过前置放大器(PA)、4 Hz 带通滤波器(BPF)、主放大器(MA)、采样保持器(S/H),最后进入16位模数变换器(ADC)被转换为数字量。供电电源模块(VS)向整个系统供电。制作并集成好的中红外瓦斯检测仪如图1(b)所示。

2.2 稳定性测试

为衡量仪器稳定性,在未引入任何温度补偿时,对仪器做了长时间稳定性测量实验。将仪器置于体积分数为 0×10^{-6} 的甲烷气体中,连续运行 160 h (6.5 天),每间隔 10 s 记录一次电压数值,检测仪输出电压随时间的变化关系如图2所示。对测量结果进行细化观察,可以看到,电压上下波动的最大值为 50 mV,与满量程对应的输出电压 5 V(对应体积分数为 40×10^{-3})相比,为 $50 \text{ mV}/5 \text{ V} = 1\%$ 。根据 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 下甲烷气体体积分数和检测通道输出电压的拟合关系式:

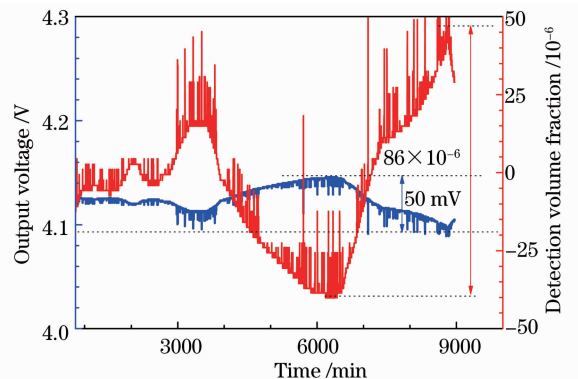


图2 仪器稳定性(输出电压)测量曲线
Fig. 2 Measurement results of instrument stability

$$U_t = 2.3364 \exp(-2.52 \times C) + 1.7854, \quad (1)$$

$$C = 0\% \sim 100\%,$$

式中 U_t 为检测通道输出电压, C 为甲烷气体体积分数。可得 $dC|_{c=0} = \frac{dU}{-2.52 \times 2.3364} \approx 84 \times 10^{-6}$ 。

该结果与图 2 中气体浓度的实验测量结果 (86×10^{-6}) 基本一致。

3 温度补偿及实验测试

3.1 温度补偿原理

实验中仅考虑检测通道输出电压的温度变化特性。不失一般性, 视红外光源为点光源进行分析, 同时令探测器检测通道敏感面截面积为 S_1 。在方波调制下, 设 i 为红外光源驱动电流的峰谷值, 则光源发出光强的峰谷值为 $I_0(\lambda_1) = K(\lambda_1)i$, 其中 $K(\lambda_1)$ 为光源在 λ_1 波长处的电光转换系数。经过吸收池后 (吸收光程为 L), 到达探测器滤波窗口的光强为

$$I_t(\lambda_1) = K(\lambda_1)i \exp[-\alpha(\lambda_1)CL - \beta(\lambda_1)], \quad (2)$$

式中 $\beta(\lambda_1)$ 为光路和气室在 λ_1 波长处的噪声干扰。则两敏感面接收到的辐射功率可表示为

$$\psi_t(\lambda_1) = \int_{S_1} I_t(\lambda_1) \frac{\cos \theta}{r^2} dS, \quad (3)$$

式中 dS 为敏感面上的微元, r 为点光源到该微元的距离, θ 为点光源到该微元的入射光线与微元法线的夹角。经过探测器光电转换后输出的峰谷值电压 $u_t(\lambda_1)$ 可表示为

$$u_t(\lambda_1) = G(\lambda_1)\psi_t(\lambda_1), \quad (4)$$

式中 $G(\lambda_1)$ 和 $G(\lambda_2)$ 是光伏探测器在 λ_1 和 λ_2 波长处的光电转换系数。

在一般情况下, 探测器输出的电信号将通过一系列的电路做处理, 包括前置放大、主放大、硬件滤波和采样保持等模块。因此, 当考虑放大电路的增益 K_1 后, 到达 ADC 的电压信号峰谷值可表示为

$$U_t(\lambda_1) = K_1 u_t(\lambda_1), \quad (5)$$

将(2)~(4)式代入(5)式, 可得

$$U_t(\lambda_1) = \left(\int_{S_1} \frac{\cos \theta}{r^2} dS \right) K_1 G(\lambda_1) K(\lambda_1) i \times \exp[-\alpha(\lambda_1)CL - \beta(\lambda_1)], \quad (6)$$

最后可得甲烷浓度表达式为

$$C = -\frac{1}{\alpha(\lambda_1)L} \ln \left[\frac{U_t(\lambda_1)}{K_1 G(\lambda_1) K(\lambda_1) \left(\int_{S_1} \frac{\cos \theta}{r^2} dS \right) i} \right] - \frac{\beta(\lambda_1)}{\alpha(\lambda_1)L}. \quad (7)$$

$$\text{设 } M = -\frac{1}{\alpha(\lambda_1)L}, N = \frac{1}{K_1 G(\lambda_1) K(\lambda_1) \left(\int_{S_1} \frac{\cos \theta}{r^2} dS \right) i}$$

$Q = M\beta(\lambda_1)$, 可得待测气体浓度为

$$C = M \ln[N U_t(\lambda_1)] + Q. \quad (8)$$

由(8)式可以看出, 尽管采用双通道结构可消除光源、光路及环境因素变化影响, 然而 $U_t(\lambda_1)$ 受温度 T 影响, 当 T 变化剧烈时, 将会严重影响仪器稳定性和可靠性。

3.2 探测器输出电压与温度关系的测量实验

将检测仪置于型号为 ZK-82B 干燥箱中, 该干燥箱的工作温度范围为室温至 200°C , 温度波动为 $\pm 1^\circ\text{C}$, 在工作温度范围内可任意设定温度并自动控制, 达到恒温状态, 并与外部环境密封隔绝。仪器通电至运行稳定, 将温度箱调至所需温度, 温度上升稳定后, 放入仪器, 关闭箱门; 监测仪器温度, 待其从室温升至设定温度并稳定。然后, 缓慢降至室温, 设置不同温度值, 重复上述实验, 测量并记录不同温度下仪器的输出电压。经过多次测量并取均值, 在 $25^\circ\text{C} \sim 45^\circ\text{C}$ 范围内, 测量仪器温度与检测通道输出电压的对应关系曲线如图 3 所示。选取一个温度点 (25°C) 设为参考点, 将其他电压与该值比较, 得出偏差值, 并对该偏差值进行拟合, 得到关系式为

$$\Delta U_t = U_t(T) - U_t(T = 25^\circ\text{C}) = -9.79876T + 240.42518. \quad (9)$$

因此, 考虑温度变化对电压的影响后, 重新得到温度补偿后的气体体积分数表达式为

$$C = M \ln\{N[U_t(\lambda_1, T) - \Delta U_t(\lambda_1, T)]\} + Q. \quad (10)$$

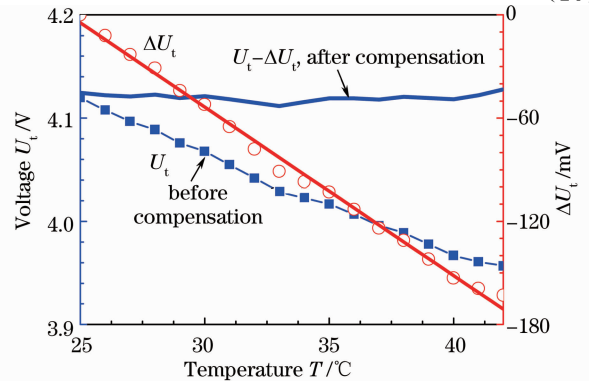


图 3 温度补偿前以及温度补偿后, 探测器检测通道输出电压随温度的变化曲线和电压漂移随温度的变化曲线

Fig. 3 Before and after temperature compensation, curves of output voltage from detection channel versus temperature, and curve of voltage variation versus temperature

3.3 温度补偿后的仪器稳定性实验

引入温度补偿后,利用检测仪测量气体体积分数为 0×10^{-6} 的甲烷气体,测量过程持续 160 h (6.5 天),测量结果如图 4 所示。对比图 2,可以看出,仪器检测通道输出电压的每周波动范围从 1% 降至 $23 \text{ mV}/5 \text{ V} = 0.46\%$;转换为气体体积分数后,检测结果的波动范围约为 37×10^{-6} ,该值比温度补偿前的 86×10^{-6} 减小了一半以上。因此,通过

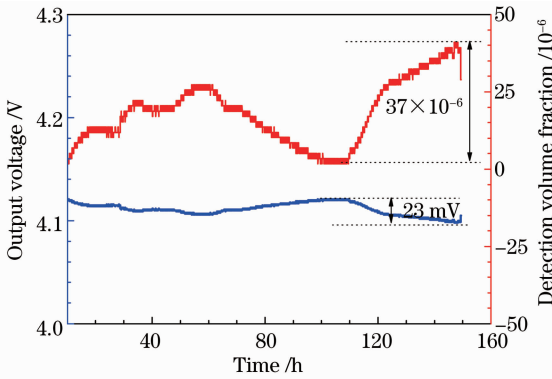
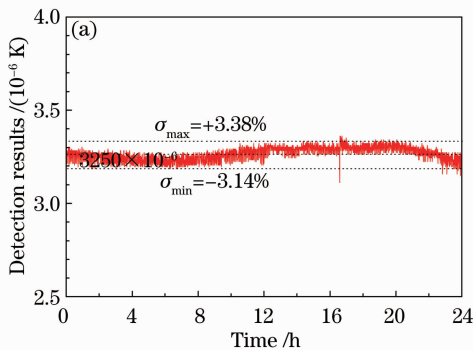


图 4 温度补偿后,仪器检测通道输出电压以及气体体积分数测量结果的稳定性曲线

Fig. 4 Stability measurement of output voltage from detection channel and volume fraction of gas after temperature compensation



引入温度补偿,仪器的稳定性得到了增强。

3.4 仪器阿伦方差的测试结果

为了进一步衡量仪器的稳定性,在引入温度补偿的情况下,将仪器置于气体体积分数为 3250×10^{-6} 的气体中,连续运行 24 h 采集仪器输出电压,采样周期为 27.4 s,结果如图 5(a) 所示。图中可知,仪器测量值与准确值的最大误差 σ_{\max} 为 $+3.38\%$,最小误差 σ_{\min} 为 -3.14% 。

由于传感器的随机误差具有慢时变、非平稳的特点,因此,为了更准确地分析仪器的稳定性,引入了阿伦方差^[14-15],该方法已被广泛地应用于各种传感器的随机误差分析中,其表达式为

$$A_r^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle [\bar{C}_2^{k+1}(\tau) - \bar{C}_2^k(\tau)]^2 \rangle \triangleq \frac{1}{(M-1)} \sum_{k=1}^{M-1} \frac{1}{2} [C_2^{k+1}(\tau) - C_2^k(\tau)]^2, \quad (11)$$

式中 τ 为采样周期, $\bar{C}_2^k(\tau)$ 为在采样周期内的 k 阶平均浓度, M 为采样点总个数, \triangleq 是对阿伦方差的估算算子。根据图 5(a) 的测试结果,计算了仪器在该气体体积分数下的阿伦方差曲线,如图 5(b) 所示。可以看出,当采样时间大于 500 s,阿伦方差趋于定值,其标准差小于 10×10^{-6} 。

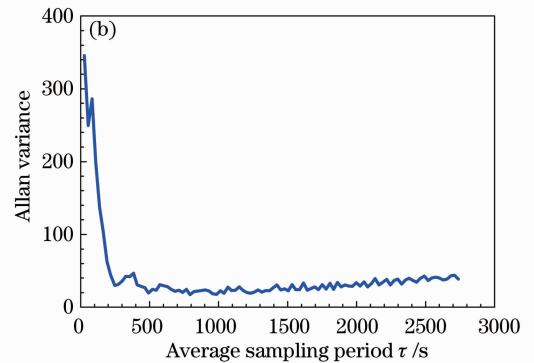


图 5 (a) 仪器对气体体积分数为 3250×10^{-6} 样品的测量结果;(b) 检测仪的阿伦方差曲线

Fig. 5 (a) Detection results on the sample gas with volume fraction of 3250×10^{-6} ; (b) Allan variance plot of the detection device

4 结 论

针对研制的便携式甲烷检测仪,为了抑制温度变化对仪器检测性能的影响,实验研究了仪器输出电压随温度的变化关系,并对温度漂移造成的电信号偏差进行了补偿。引入温度补偿后的实验结果显示,针对气体体积分数为 0×10^{-6} 的样品气体,仪器输出电压每周相对波动从 1% 降至 0.46%,气体体积分数波动范围从 86×10^{-6} 降至 37×10^{-6} 。针对

气体体积分数为 3250×10^{-6} 的样品气体,计算了仪器的阿伦方差曲线,当采样时间大于 500 s 时,阿伦方差几乎趋于定值,其标准差小于 10×10^{-6} 。因此,通过温度补偿,在一定程度上消除了环境温度的影响,从而改善了仪器的稳定性。

参 考 文 献

- Ye Weilin, Lü Ruihong, Song Fang, et al.. Experimental study of a voltage-fluctuation suppressing method based on second-

- quantification in methane detection [J]. *J Optoelectronics•Laser*, 2012, 23(6): 1140–1145.
- 叶玮琳, 吕瑞红, 宋芳, 等. 甲烷检测中电压噪声的二次量化抑制及其实验研究[J]. *光电子·激光*, 2012, 23(6): 1140–1145.
- 2 J Yan, P H Meng. Research on methane concentration monitoring system based on electro-optical modulation interference [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(8): 2153–2156.
- 3 M Choudhary, V N Mishra, R Dwivedi. Solid-state reaction synthesized Pd-doped tin oxide thick film sensor for detection of H₂, CO, LPG and CH₄ [J]. *J Material Science-Material in Electronics*, 2013, 24(8): 2824–2832.
- 4 Feng Lin, Hu Shunxing, Huang Jian, *et al.*. A new method for atmospheric CO₂ balloonsonde measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(10): 100103.
冯林, 胡顺星, 黄见, 等. 一种新的CO₂探空测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(10): 100103.
- 5 Wang Liusan, Cao Zhensong, Wang Huan, *et al.*. A widely tunable mid-infrared difference frequency generation laser and its detection of atmospheric water [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0414003.
汪六三, 曹振松, 王欢, 等. 宽调谐中红外差频激光及大气水汽浓度探测[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0414003.
- 6 Wang Renbao, Feng Hongyan. Laser absorption spectrometer methane detection system based on digital signal processor [J]. *J Optoelectronics•Laser*, 2010, 21(1): 38–41.
王仁宝, 冯红艳. 基于数字信号处理器的激光光谱甲烷监测系统[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(1): 38–41.
- 7 Qiao Xueguang, Wang Jia, Jia Zhen'an, *et al.*. Experiment research for optical fiber methane gas sensor [J]. *J Optoelectronics•Laser*, 2009, 20(7): 851–854.
乔学光, 王佳, 贾振安, 等. 光纤CH₄气体传感器的实验研究[J]. *光电子·激光*, 2009, 20(7): 851–854.
- 8 Bai Shouli, Chen Liangyuan, Yang Pengcheng, *et al.*. Sn/In/Ti nanocomposite sensor for CH₄ detection [J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2008, 135(1): 1–6.
- 9 Bo Tao, Xisheng Ye, Zhiyun Hu, *et al.*. On-line measurement of temperature and water vapor in CH₄/air premixed flame using near-infrared diode laser [J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(11): 1098–1101.
- 10 Peng Yuefeng, Wei Xingbin, Wang Weimin, *et al.*. High-efficiency 2.7 μm tunable mid-infrared laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2624–2628.
彭跃峰, 魏星斌, 王卫民, 等. 高效率中红外2.7 μm可调谐激光器[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2624–2628.
- 11 Zhang Yu, Gao Wenzhu, Song Zhenyu, *et al.*. Design of a novel gas sensor structure based on mid-infrared absorption spectrum [J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2010, 147(1): 5–9.
- 12 Li Lei, Cao Feng, Wang Yiding, *et al.*. Design and characteristics of quantum cascade laser-based CO detection system [J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2009, 142(1): 33–38.
- 13 Ye Weilin, Zheng Chuantao, Yu Xin, *et al.*. Design and performances of a mid-infrared CH₄ detection device with novel three-channel-based LS-FTF self-adaptive denoising structure [J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2011, 155(1): 37–45.
- 14 S O'Keefe, M Ortoneda, J D Cullen, *et al.*. Development of an optical fiber sensor system for online monitoring of microwave plasma UV and ozone generation system [C]. 2008 IEEE Sensors, 2008, 454–457.
- 15 Do Eok Kim, Hwan Joo Lee, Eun Jong Cha, *et al.*. Development of non-invasive optical transcutaneous pCO₂ gas sensor and analytic equipment [C]. *Proceedings of IEEE Sensors*, 2005, 2: 2087–2090.

栏目编辑：何卓铭