

基于超窄线宽激光的一氧化碳多参数检测研究

陈 霄, 隋青美, 苗 飞, 贾 磊, 王 静, 姜明顺

山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061

摘 要 基于超窄线宽激光特性和激光器波长扫描技术, 通过对一氧化碳气体近红外吸收光谱的测量及分析, 设计了一氧化碳气体多参数实时在线检测系统。系统采用超窄线宽可调谐半导体激光器作为光源, 利用气体直接吸收光谱测温法, 实现了一氧化碳气体温度实时检测。根据所测温度值并结合气体浓度差分检测原理, 实现了一氧化碳气体温度和浓度同时测量。利用超窄线宽激光器波长扫描技术还测得了不同温度下一氧化碳分子在 $6\,354\,179$ 和 $6\,383\,09\,\text{cm}^{-1}$ 附近的吸收谱线并进行了 Voigt 拟合和分析。实验结果表明, 系统温度测量最大相对误差小于 4% , 长时间稳定性实验, 温度最大相对波动小于 3.5% ; 系统浓度测量最大相对误差小于 5% , 最小检测限为 0.05% 。该气体多参数检测系统精确度高、稳定性好, 可用于电力变压器故障气体状态实时在线监测。

关键词 一氧化碳吸收光谱; 超窄线宽激光; 多参数测量; 波长扫描技术; 吸收线强

中图分类号: O433.1 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)10-2829-05

引 言

电力变压器是电力系统的重要枢纽环节, 其运行状态直接影响到电网系统运行的安全性和稳定性。随着国民经济的不断发展和人民需求的不断提高, 电网负荷不断提高, 变压器容量不断扩大, 事故率也就随之增大。因此对电力变压器运行状态进行实时或定时的在线监测具有重要意义。研究表明变压器内部温度及绝缘油中溶解气体的组分、含量与变压器故障类型、程度存在十分密切的对应关系。一氧化碳气体是电力变压器主要的故障气体之一, 通过对变压器中一氧化碳气体的参数(温度、浓度)进行实时在线监测可以及时掌控变压器运行状态, 发现和分析潜伏性故障, 有效保障变压器安全稳定的运行^[1,2]。

目前电力变压器故障状态分析主要采用离线色谱分析技术和电接触式测温技术, 这些技术在使用过程中均存在一些缺点: 电接触式测温系统在高温、强磁场、强振动等恶劣环境下受扰动较大; 色谱分析技术为定期从变压器运行现场采集油样后, 在实验室中使用气相色谱仪检测出油中溶解气体浓度, 无法实现气体浓度实时在线测量。随着光纤传感技术和半导体激光技术的不断发展, 基于半导体激光吸收光谱技术的光纤在线监测系统已逐渐在电力变压器故障分析中得到了应用。可调谐半导体激光吸收光谱技术是利用气体对激光

光谱吸收的特性实现气体温度和浓度的测量, 具有抗干扰能力强、实时性好、精度高和可实现气体温度和浓度同时在线测量等优点^[3-8]。

本文利用超窄线宽激光特性和光源扫描技术测得了不同温度下的一氧化碳气体吸收光谱, 并结合气体直接吸收光谱测温法和浓度差分检测原理, 实现了一氧化碳气体的温度和浓度实时在线检测, 为电力变压器故障预测和分析提供了有效的技术手段。

1 系统原理

1.1 气体直接吸收光谱测温法

1.1.1 测量原理

基于直接吸收光谱技术的气体测温法是通过扫描待测气体两个独立的特征吸收谱线, 根据两个吸收线强比值和待测温度的关系实现气体温度的测量^[9]。由 Lambert-Beer 定律可知, 当一束频率为 ν 的单色光通过含有待测信息的密闭空间时, 其光强变化关系表示为

$$\ln \left[\frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} \right] = -PS(T)\beta(\nu)cL \quad (1)$$

式中: $I_0(\nu)$ 为单色光透过不含待测气体气室时的光强; L 为有效吸收光程长; P 为被测气体所在空间的压力; c 为被测气体浓度; β_ν 为吸收线性函数, 表示被测吸收谱线形状, 与

收稿日期: 2011-04-02, 修订日期: 2011-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(61074163)资助

作者简介: 陈 霄, 1985 年生, 山东大学控制科学与工程学院博士研究生 e-mail: cx_012003@yahoo.com.cn

©1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

气体类别、压力、温度等有关,且 $\int \beta_i d\nu = 1$; $S(T)$ 为温度为 T 时该谱线的强度,可表示为

$$S_i(T) = S_i(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \left(\frac{T_0}{T} \right) \exp \left[- \frac{hcE''_i}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \times \frac{1 - \exp(-hc\nu_{0i}/kT)}{1 - \exp(-hc\nu_{0i}/kT_0)} \quad (2)$$

式中: $S_i(T_0)$ 为参考温度 T_0 下被测吸收谱线的线强, 可查阅 HITRAN 数据库获得; Q 为总的分子内部分割函数; E''_i 为低跃态能量; ν_{0i} 为跃迁频率; h 为普朗克常数; k 为波尔兹曼常数; c 为光速; 温度低于 2 500 K、波长小于 2 500 nm 情况下最后一项可以忽略。

对式(1)两边在全频域上积分得

$$\int_{-\infty}^{+\infty} -\ln \left[\frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} \right] d\nu = \int_{-\infty}^{+\infty} PS(T) \beta(\nu) cL d\nu \quad (3)$$

由于式(3)中 P , $S(T)$, c , L 与 ν 无关, 且 $\int_{-\infty}^{+\infty} \beta(\nu) d\nu = 1$;

$\int_{-\infty}^{+\infty} -\ln \left[\frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} \right] d\nu$ 为单条吸收谱线光谱的积分面积, 用 A 表示。式(3)可表示为^[10]

$$A = PS(T) cL \quad (4)$$

利用光谱吸收技术对气体温度的测量是根据不同温度下两条吸收谱线的强度比值实现的, 由于谱线对测量中 P , c , L 均不变, 吸收谱线对的强度比值可表示为

$$R = \frac{S_1(T)}{S_2(T)} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{S_1(T_0)}{S_2(T_0)} \cdot \exp \left[- \left(\frac{hc}{k} \right) (E''_1 - E''_2) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (5)$$

由式(5)得知 R 是温度 T 的函数, 通过测量两条吸收谱线强度比值 R , 即吸收谱线对积分面积比就可以得到温度 T , 因此吸收谱线对选择会直接影响气体温度测量的结果^[11]。

1.1.2 吸收谱线对选择

所选吸收谱线对如表 1 所示, 根据 HITRAN 2004 数据库得知一氧化碳气体所选吸收线对两侧没有其他故障气体 (CH_4 , CO_2 , SF_6 等) 的强吸收线, 受其他气体干扰非常小。谱线对线强在测量温度范围内较大, 且线强值与温度存在较好的唯一对应关系, 温度测量中可以获得较好的谱线对线强数据值, 从而可以有效的提高温度测量精度。

测量灵敏度是温度测量中的一个重要指标, 比值 R 对温度 T 的灵敏度可表示为^[12]

$$\frac{dR/R}{dT/T} = \left(\frac{hc}{k} \right) \frac{1(E''_1 - E''_2)}{T} \quad (6)$$

由式(6)得知灵敏度大小与谱线对的低能态能量差有关, 能

量差越大, 温度测量的灵敏度就越高。根据表 1 值所示, 所选谱线对低态能量差为 $E''_2 - E''_1 = 172.978$, 其低能量差值较大, 温度测量具有较好的灵敏度。

1.2 气体浓度差分检测原理

气体浓度差分检测法是利用超窄线宽激光能精确锁定气体吸收峰中心且带宽远小于单条气体吸收谱线宽的特性, 采用光源波长扫描技术将输出波长分别锁定在气体强吸收峰中心和吸收强度为零处, 通过测量两次吸收后的透射光强值与浓度的关系来检测气体浓度。

有两束波长分别为 λ_1 和 λ_2 的光通过一氧化碳气体, 其中 λ_1 为气体吸收峰, λ_2 为非吸收峰。由 Lambert-Beer 定律可得

$$I(\lambda_1) = kI_0(\lambda_1) \exp[-\alpha(\lambda_1)cL + \gamma(\lambda_1)c'L + \beta(\lambda_1)L + \eta] \quad (7)$$

$$I(\lambda_2) = kI_0(\lambda_2) \exp[-\alpha(\lambda_2)cL + \gamma(\lambda_2)c'L + \beta(\lambda_2)L + \eta] \quad (8)$$

式中: $\alpha(\lambda)$ 为一氧化碳气体吸收系数; $\gamma(\lambda)$ 为其他干扰气体相对吸收系数; c' 为其他干扰气体相对浓度; $\beta(\lambda)$ 为散射系数; η 为其他不确定干扰因子。式(8)和(7)两边分别取对数相减得

$$\ln \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} = \ln \frac{I_0(\lambda_2)}{I_0(\lambda_1)} + \alpha(\lambda_1)cL - \alpha(\lambda_2)cL + \gamma(\lambda_2)c'L - \gamma(\lambda_1)c'L + \beta(\lambda_2)L - \beta(\lambda_1)L \quad (9)$$

当 λ_1 和 λ_2 距离比较近时, $\beta(\lambda_1) \approx \beta(\lambda_2)$, 空气和其他故障气体成分在 λ_1 和 λ_2 处的吸收系数非常小, 可以认为 $\gamma(\lambda) \approx 0$ 并设定光初始光强 $I_0(\lambda_1) = I_0(\lambda_2)$ 且非吸收峰 λ_2 处 $\alpha(\lambda_2) \approx 0$, 式(9)化简为

$$\ln \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} = \alpha(\lambda_1)cL \quad (10)$$

根据气体直接吸收光谱测温法可测得一氧化碳气体温度值, 即可以确定吸收系数 $\alpha(\lambda_1)$ 。式(10)说明在光程长和吸收系数确定且不变情况下, 一氧化碳浓度和两束光吸收后的透射光强有关^[13]。实验中采用的气体浓度差分检测法可以消除其他气体成分、灰尘颗粒以及光源抖动的影响, 有效地提高系统浓度检测精度。

1.3 激光波长扫描技术

可调谐半导体激光器内部原理图如图 1 所示, LD 和反射镜形成法布里-珀罗共振发光后, 经光栅衍射产生的一级衍射光先投射到一个反射镜上, 再由反射镜原路反射回光栅产生第二次衍射使一级衍射光反馈回激光器。当增益超过由部分反射和散射等多种因素引起的总损耗, 经过谐振腔的选频作用, 特定频率的光波在谐振腔内积累能量并通过反射镜射出, 形成激光。调节反射镜与衍射光栅夹角可以选择不同

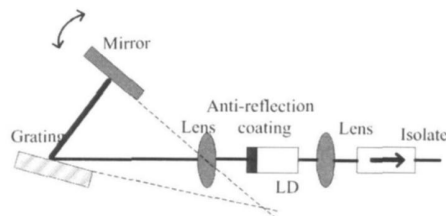


Fig 1. Principle diagram of Laser

Table 1 Parameters of absorption lines
of CO in HITRAN database

ν_0/cm^{-1}	$S_i(T_0)/[\text{cm}^{-1} \cdot (\text{molec} \cdot \text{leg} \cdot \text{cm}^{-2})^{-1}]$	E''_1/cm^{-1}
6 354 179	4 208E-24	0 0
6 383 090	2 034E-23	172 978

的谐振波长, 将反射镜与压电陶瓷相连, 用函数发生器扫描与反射镜连接的压电陶瓷, 从而可以连续调节反射镜的位置, 使激光器的输出波长在一定范围内扫描。

2 系统设计及实验装置

设计的一氧化碳多参数检测系统实验结构图如图 2 所示。系统主要由超窄线宽激光光源、信号发生器、传感气室、电加热设备、波长计、光电转换部分和信号处理部分组成。

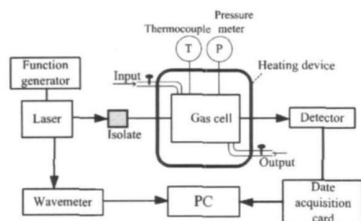


Fig. 2 Schematic of the experiment system

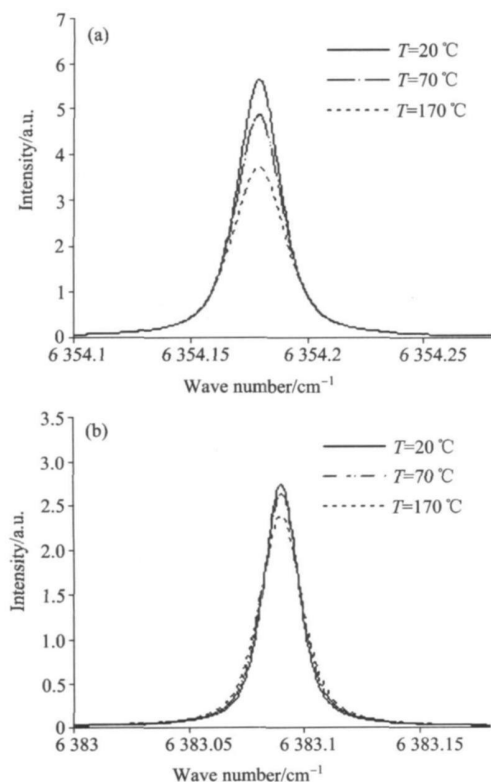


Fig. 3 Absorption spectra of carbon monoxide at different temperatures

(a): $\nu_0 = 6354.139 \text{ cm}^{-1}$; (b): $\nu_0 = 6383.09 \text{ cm}^{-1}$

系统选用超窄线宽半导体激光器作为光源, 光源输出稳定, 波长扫描范围广, 激光带宽窄(小于 0.1 pm), 最大输出功率可达到 10 mW 。经过多次长时间测试, 波长波动小于 $\pm 1 \text{ pm}$ 、精确度为 $\pm 1 \text{ pm}$ 。激光器输出的超窄线宽激光具有能精确锁定气体吸收峰中心且带宽远小于单条气体吸收谱线宽的特性, 有效地排除其他气体干扰, 提高系统浓度检测精

度。实验中将 SP-F40 型信号发生器接入光源波长调节接口, 出射激光被分为两束, 一束经过光隔离器穿过气室中的被测气体后由 New focus 光电探测器接收, 光电转换后的电信号由数据采集卡采集后传入计算机, 计算机对数据进行处理、显示; 另一束光直接输入与计算机相连接的 HP 波长计, 精确测量激光器的输出波长和功率, 并通过计算机记录。实验中气室有效光程长约为 360 cm , 放置于干燥加热箱中, 并在气室中安置高精度温度计和压力表准确测量气室中温度和压力值。

3 实验过程及结果分析

3.1 气体吸收谱线

用洁净的氮气清洗气室并将一定体积的一氧化碳气体充入纯净气室内。选定一氧化碳气体在 6354.179 和 6383.09 cm^{-1} 附近吸收光谱进行分析, 一氧化碳在此处吸收线较强, 无其他相关气体干扰。实验中保持气室压强为 1 atm , 调节加热箱温度, 利用超窄线宽光源的波长扫描技术分别测得一氧化碳气体在 $20, 70$ 和 $170 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时吸收谱线光谱并用 Voigt 函数拟合, 如图 3 所示。图 3 中谱线对强度较大且与温度有较好的线性关系。分别测得并拟合 $10 \sim 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 内 10 对气体吸收谱线光谱, 积分算出不同温度的比值 R , 测得 R 与气体温度关系拟合曲线如图 4 所示, 随着温度的升高, 比值 R 下降, 两者具有较好的唯一对应关系。

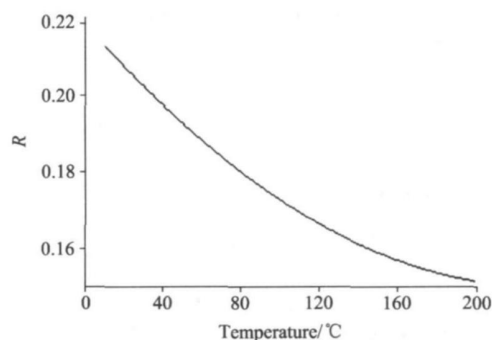


Fig 4 Curve of relationship between ratio R and temperature

3.2 气体温度检测

3.2.1 精确度实验

将浓度为 5% , 8% , 12% 和 15% 标准一氧化碳气体分别充入氮气清洗过的洁净气室, 保持气室压强为 1 atm 。为了消除测量随机误差, 取二十次测量的平均值作为透射光强度。调节加热箱温度值, 不同浓度下所测温度值与标准温度计数值关系曲线如图 5 所示。测得的数据与校准温度计数值一致性比较好, 在 $10 \sim 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 内测量最大相对误差小于 4% 。

3.2.2 稳定性实验

将一定体积的一氧化碳气体充入氮气清洗过的洁净气室进行系统稳定性实验, 保持气室压强为 1 atm 。调节加热箱温度, 每隔 2 min 记录一次测量结果, 如图 6 所示。一氧化碳气体在 60 min 时间内所测温度最大相对波动小于 3.5% ,

结果表明该传感系统具有良好的稳定性和重复性。

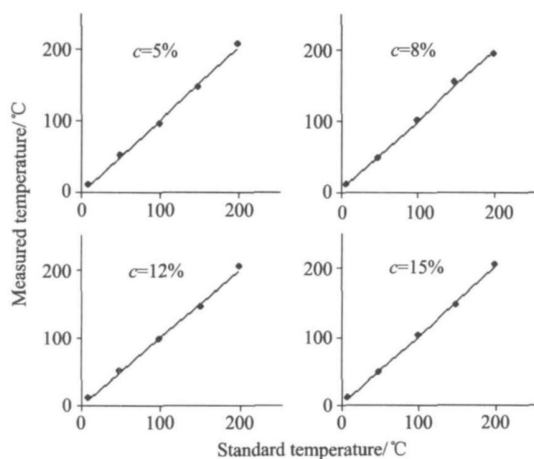


Fig. 5 Measurement results and fitting straight lines of carbon monoxide temperature at different concentrations

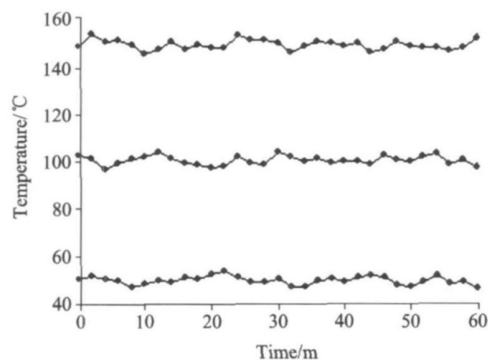


Fig. 6 Experimental curve of stability test

3.3 气体浓度检测

将方波信号接至光源波长调制接口, 调节信号幅值使光源产生 $\nu_1 = 6383.09 \text{ cm}^{-1}$ 和 $\nu_2 = 6382.8 \text{ cm}^{-1}$ 的超窄线宽激光, ν_1 和 ν_2 分别为一氧化碳气体吸收峰和非吸收峰中心波数。用洁净的氮气清洗气室并注入 5% 的标准一氧化碳气体,

将气室放置恒温的加热箱中, 保持气室压强为 1 atm。根据气体直接吸收光谱测温方法测得气体温度为 102.3°C , 此时标准温度计显示为 100°C , 误差为 2.3%, 在温度精度实验 4% 误差内。以实验中测得温度为基础, 测量浓度与实际浓度关系曲线如图 7 所示, 系统最低检测限为 0.05%, 测量线性度较好, 且浓度测量最大相对误差小于 5%。

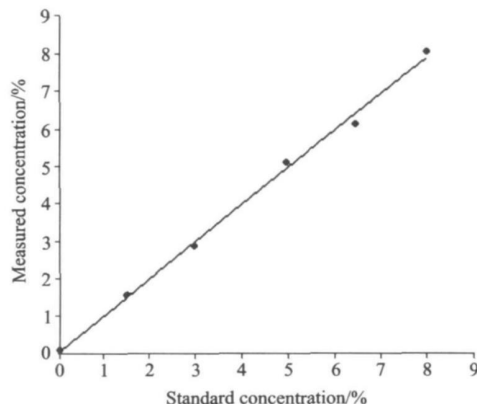


Fig. 7 Measurement results and fitting straight line of carbon monoxide concentration

4 结 论

本文采用了超窄线宽可调谐激光器作为光源, 利用气体直接吸收光谱测温技术、浓度差分检测技术和超窄线宽激光特性相结合, 实现了一氧化碳气体的多参数实时在线检测。实验结果表明系统温度检测最大相对误差小于 4%, 长时间测量最大波动小于 3.5%; 浓度最低检测限为 0.05%, 测量最大相对误差小于 5%。利用超窄线宽激光扫描和光强检测技术进一步测得了不同温度下一氧化碳分子在 6354.179 和 6383.09 cm^{-1} 附近的吸收谱线, 分析了线强比值与气体温度的关系。一氧化碳多参数检测系统具有检测精度高、稳定性好等特点, 适合用于气体多参数实时在线检测, 在电力变压器安全监测等领域具有很好的应用前景。

References

- [1] ZHAO Xiao-xiao, YUN Yu-xin, CHEN Wei-gen (赵笑笑, 云玉新, 陈伟根). Power System Protection and Control (电力系统保护与控制), 2009, 37(23): 189.
- [2] Duval M. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(3): 8.
- [3] WANG Jian, HUANG Wei, GU Hai-tao, et al (王健, 黄伟, 顾海涛, 等). Journal of Optoelectronics • Laser (光电子 • 激光), 2006, 17(10): 1233.
- [4] Cai T D, Jia H, Wang G S, et al. Sensors and Actuators A, 2009, 152: 5.
- [5] CHEN Dong, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, et al (陈东, 刘文清, 张玉钧, 等). Chinese Journal of Lasers (中国激光), 2006, 33(11): 1552.
- [6] ZHAO Jian-hua, ZHAO Chong-wen, WEI Zhou-jun (赵建华, 赵崇文, 魏周君). Acta Optica Sinica (光学学报), 2011, 30(2): 567.
- [7] Uotila J, Koskinen V, Kauppinen J. Vibrational Spectroscopy, 2005, 38: 329.
- [8] QIAO Xue-guang, WANG Jia, JIA Zhen-an, et al (乔学光, 王佳, 贾振安, 等). Journal of Optoelectronics • Laser (光电子 • 激光), 2009, 20(7): 886.
- [9] Liu J T C, Rieker G B, Jeffries J B, et al. Applied Optics, 2005, 44(31): 6701.
- [10] Li H J, Farooq A, Jeffries J B, et al. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 2008, 109: 122.

- [11] Zhou X, Liu X, Jeffries J B, et al. Measurement Science and Technology, 2003, 14: 1459.
- [12] LI Ning, YAN Jian-hua, WANG Fei, et al(李 宁, 严建华, 王 飞, 等). Journal of Combustion Science and Technology(燃烧科学与技术), 2008, 14(5): 458.
- [13] Gharavi M, Buckley S G. Journal of Molecular Spectroscopy, 2005, 229: 78.

Research on Carbon Monoxide Multi-Parameter Detection Based on Ultra-Narrow Linewidth Laser

CHEN Xiao, SUI Qing-mei, MIAO Fei, JIA Lei, WANG Jing, JIANG Ming-shun

School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jí nan 250061, China

Abstract Through measuring and analyzing the infrared absorption spectrum of carbon monoxide, a kind of carbon monoxide multi-parameter detection system was designed based on the characteristics of ultra-narrow-linewidth laser and the spectrum scanning technology. A ultra-narrow-linewidth tunable semiconductor laser was utilized as light source and carbon monoxide temperature detection was achieved by measuring direct absorption spectra at different temperatures. According to temperature data and the principle of differential absorption concentration detection, carbon monoxide concentration and temperature were obtained simultaneously. With the spectrum scanning technology of ultra-narrow-linewidth laser, the spectra of carbon monoxide near the region of 6 354 179 and 6 383 09 cm^{-1} at different temperatures were measured, and also analyzed and fitted by Voigt profile. Finally the experiments indicate that the temperature measurement relative error is less than 4% and relative temperature fluctuation is less than 3.5%; the concentration measurement relative error is less than 5%, and the minimum detectable carbon monoxide is 0.05%. The multi-parameter detecting system has advantages of high accuracy and good stability, and can be used in power transformer fault gases on-line monitoring in real time.

Keywords Carbon monoxide absorption spectrum; Ultra-narrow-linewidth laser; Wavelength scanning technology; Absorption line strength; Multi-parameter detecting

(Received Apr. 2, 2011; accepted Jul. 13, 2011)