

文章编号 1004-924X(2011)07-1495-08

# 应用单一超窄线宽激光器的多气体检测系统设计

陈 霄\*, 隋青美, 苗 飞, 王 静

(山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:**应用超窄线宽半导体激光器的波长扫描和光谱调制技术,设计了一种高精度多组分气体实时在线检测系统。系统采用单一超窄线宽可调谐半导体激光器作为光源,设计了新型串联式气室结构减小横向空间、增加光程长,并通过三角波信号对光源光谱进行调制;结合时分复用和空分复用技术,利用超窄线宽激光的特性实现了CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>多组分气体浓度的同时多点检测。实验结果表明,对CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>多组分气体浓度测量的线性相关度为0.99,最大相对误差<2%;逐次充入一定体积CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、CO气体,动态响应时间均小于10 s。长时间稳定性实验显示,多组分气体浓度最大波动<0.02%。该系统精确度高、稳定性好,具有较好的动态响应特性,可用于电力变压器故障气体的实时在线监测。

**关键词:**激光光学;多组分气体检测;波长扫描技术;超窄线宽激光器;谐波检测;串联气室

**中图分类号:** TN248.4; TN253      **文献标识码:** A      **doi:** 10.3788/OPE.20111907.1495

## Design of detecting system for multi-component gases based on single ultra-narrow-linewidth laser

CHEN Xiao\*, SUI Qing-mei, MIAO Fei, WANG Jing

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

\* Corresponding author, E-mail: cx\_012003@yahoo.com.cn

**Abstract:** On the basis of the wavelength scanning and spectrum modulation techniques of an ultra-narrow-linewidth semiconductor laser, a kind of multi-component gas online detection system with high precision was designed. A semiconductor laser with ultra-narrow-bandwidth and tunable wavelength was utilized as a light source and a novel series gas cell was also used to compress the horizontal space and increase the optical path of the system. By taking the sawtooth signal to modulate the spectrum of laser and using space division multiplexing (SDM) and time division multiplexing (TDM) techniques, the detection of multi-component gases (CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) based on ultra-narrow-linewidth laser characteristics was achieved. The experiments indicate that the relative measurement error is less than 2% and linearity relevance coefficient is 0.99 for the three kinds of gases. Furthermore, the system dynamic response time is less than 10 s by filling a volume of multi-component gas into the gas cell gradually. Finally, the result of long time stability monitoring shows that the maximum concentration fluctuation is less than 0.02%. The system has advantages of high accuracy, good stability and quick response, and is suitable for the fault gas monitoring of power transformers in real time.

收稿日期:2011-03-08;修订日期:2011-04-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61074163)

**Key words:** laser optics; multi-component gas detection; wavelength scanning technique; ultra-narrow-linewidth laser; harmonic detection; series gas cell

## 1 引言

电力变压器是电力系统中最重要电气设备之一,其是否安全稳定运行将影响供电可靠性和系统的正常运行,因此,及时准确地检测出变压器的潜伏性故障具有十分重要的意义。研究表明,变压器绝缘油中溶解气体的组分和含量与变压器故障类型、程度存在十分密切的对应关系。通过分析变压器绝缘油中故障气体的种类及含量可以及时诊断变压器的运行状况,预防变压器故障的发生。绝缘油中溶解气体的分析(Dissolved Gas Analysis, DGA)因能在变压器运行过程中进行故障诊断且不受外界电场和磁场的影响,已成为诊断油浸电力变压器早期故障及预防灾难性事故的最有效方法之一<sup>[1-2]</sup>。

近些年来,变压器油中的 DGA 主要采用离线色谱检测技术,即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的气体,进而诊断变压器的故障类型,但这种技术存在检测程序复杂、周期长,无法实现在线测量等缺点。作为离线气体分析技术的发展,在线监测技术采用高分子膜等材料进行油气分离并直接利用安装在变压器中的设备对油中溶解气体的组分和浓度进行实时在线分析,能及时掌握变压器的运行状况。

随着光纤传感技术和半导体激光技术的不断发展和实用化研究的不断深入<sup>[3-10]</sup>,基于半导体激光吸收光谱技术的光纤气体在线监测系统已经逐渐在电力变压器油中溶解气体在线监测中得到了应用<sup>[11]</sup>。基于可调谐半导体激光的光谱吸收技术是一种高灵敏度、高精度、快速响应的光谱测量技术,该技术将激光光谱调制技术与谐波检测技术相结合,利用窄线宽激光检测目标气体的一条强吸收线来实现气体浓度的实时在线检测<sup>[12-14]</sup>。本文利用半导体激光器的光谱调制技术和超宽波长扫描范围及超窄线宽激光特性实现了基于单一激光器的 3 种组分气体(CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>)实时在线检测。CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub> 气体是变压器故障气体主要组成部分,3 种气体同时检测的

实现为电力变压器故障预测和分析提供了有效的技术手段。

## 2 系统原理

### 2.1 光谱调制技术

每一种气体分子都有自己的特征吸收谱线,只有当光源发出光谱与吸收谱线相吻合时,才会发生吸收作用。根据 Lambert-Beer 定律可知,当一束频率为  $\nu$  的光通过含有待测气体时,其光强变化关系表示为<sup>[15]</sup>:

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp[-\alpha(\nu)CL], \quad (1)$$

式中,  $I_0(\nu)$  为频率为  $\nu$  的单色光透过不含待测气体的气室时的光强,  $C$  为待测气体浓度,  $L$  为气室有效光程长度,  $\alpha(\nu)$  为二氧化碳气体对频率为  $\nu$  的光的吸收系数。

气体浓度直接吸收测量易受光源抖动、光路干扰、背景噪声等因素影响,从而影响检测精度和灵敏度。光源光谱调制技术是一种有效的气体检测技术,该技术利用函数信号对激光光源的光电流进行调制,使其产生一个与所测气体浓度直接成比例的谐波信号,通过测量谐波信号值即能得到浓度信息。光谱调制技术是用一个高频的函数信号调制激光信号,由于系统的噪声被大大压缩,通过一定的计算方法还可以消除光源抖动对系统的影响。

由于系统中光源光谱能稳定锁定在气体吸收峰内且带宽远小于气体吸收谱线带宽,对光源注入高频三角波电流信号进行调制,光源频率和输出光强也受到相应的调制<sup>[16]</sup>。

$$\nu = \nu_0 + \nu_m f(t), \quad (2)$$

$$I_0(\nu) = I_0[1 + mf(t)], \quad (3)$$

式中,  $\nu$ ,  $\nu_0$  分别为光源经调制前后的中心频率;  $\nu_m$  为频率调制幅度;  $I_0$  为初始光强;  $m$  为光强调制系数;  $f(t)$  为三角调制函数,其周期函数表达式为:

$$f(t) = \begin{cases} -\frac{4t}{T} - 2, & -\frac{T}{2} \leq t \leq -\frac{T}{4} \\ \frac{4t}{T}, & -\frac{T}{4} \leq t \leq \frac{T}{4} \\ -\frac{4t}{T} + 2, & \frac{T}{4} \leq t \leq \frac{T}{2} \end{cases} \quad (4)$$

将式(2)(3)带入式(1)得:

$$I(\nu) = I_0 [1 + mf(t)] \exp\{-\alpha[\nu_0 + \nu_m f(t)]CL\}, \quad (5)$$

由于近红外波段气体吸收系数非常小, 即  $\alpha(\nu)CL \leq 1$ ,  $I(\nu)$  可近似表达为:

$$I(\nu) = I_0 \{1 + mf(t) - \alpha[\nu_0 + \nu_m f(t)]CL\}. \quad (6)$$

气体压力在一个标准大气压附近时, 气体分子的光谱线型是洛伦兹线形, 即

$$\alpha(\nu) = \frac{\alpha_0}{1 + (\frac{\nu - \nu_g}{\delta_\nu})^2}, \quad (7)$$

式中,  $\alpha_0$  为纯气体在吸收线中心吸收系数,  $\nu_g$  和  $\delta_\nu$  分别是气体峰值吸收频率和吸收谱线的半宽度, 将式(7)带入式(6)得:

$$I(\nu) = I_0 \left\{ 1 + mf(t) - \frac{\alpha_0 CL}{1 + \left[ \frac{\nu_0 - \nu_g + \nu_m f(t)}{\delta_\nu} \right]^2} \right\}, \quad (8)$$

当光源输出中心波长与气体吸收峰值保持一致时,  $\nu_0 = \nu_g$ , 令  $x = \frac{\nu_m}{\delta_\nu}$ , 得

$$I(\nu) = I_0 \left\{ 1 + mf(t) - \frac{\alpha_0 CL}{1 + x^2 f(t)^2} \right\}. \quad (9)$$

将式(9)作傅里叶级数展开, 一次谐波和二次谐波系数是:

$$I_f = 0.81mI_0, \quad (10)$$

$$I_{2f} = k\alpha_0 CL I_0, \quad (11)$$

$$\frac{I_{2f}}{I_{1f}} = \frac{k\alpha_0 CL}{0.81m}. \quad (12)$$

其中  $k$  是  $x$  的函数, 当  $x$  为 2.8 时,  $k$  取最大值。由式(10)(11)得知, 一次谐波信号幅值正比于光源光强大小; 二次谐波信号幅值与光源光强大小和气体浓度都有关。二次谐波信号幅值与一次谐波信号幅值比值不含有  $I_0$  项, 可以消除光源抖动对系统的影响, 提高系统检测精度。

### 2.2 激光波长扫描技术

超窄线宽可调谐半导体激光器波长扫描原理如图 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, 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, 从而实现单一光源的多种气体检测。

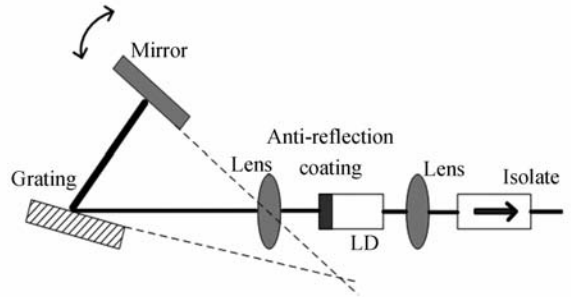


图 1 超窄线宽激光器原理图

Fig. 1 Principle diagram of ultra-narrow-linewidth laser

### 2.3 串联结构气室传感原理

系统的灵敏度可表示为输出光强变化与气体浓度变化的比值, 即<sup>[17]</sup>:

$$\frac{\Delta I}{\Delta C} = -I_0 \alpha L. \quad (13)$$

由式(13)可知, 在初始光强和吸收系数不变的情况下, 气体检测的灵敏度与气室的长度有关。要提高系统灵敏度通常采用增加有效光程长的方法, 但是由于现场尺寸的限制和光发散等原因, 气室长度不能任意加长。在这种情况下, 本文采用了 3 个气室串联叠加使用的方法, 这样既节省了横向空间又有效地增加了光程长, 提高了系统的灵敏度并有效地减少了系统测量误差。新型串联气室结构如图 2 所示, 气室四壁及内部框架由不锈钢材料制成, 光学器件固定在框架上, 气室采用带有尾纤的 3 对自聚焦透镜实现准直和聚焦功能, 具有损耗小、抗震性能好、成本低、易于拆装等特点。

$$I_1 = \eta_1 I_0 \exp[-\alpha(\nu)CL], \quad (14)$$

$$I_2 = \eta_2 \eta_1 I_0 \exp[-\alpha(\nu)2CL], \quad (15)$$

$$I_3(\nu) = \eta_3 \eta_2 \eta_1 I_0 \exp[-\alpha(\nu)3CL], \quad (16)$$

式中,  $I_0$  为入射光强;  $L$  为单个气室有效光程长, 约为 120 cm;  $I_1, I_2, I_3$  分别为 3 个气室的出射光强;  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  分别为 3 组自聚焦透镜耦合系数。由式(16)得知, 串联后气室有效光程长是原光程长的 3 倍, 有效地提高了系统的检测灵敏度和精度。

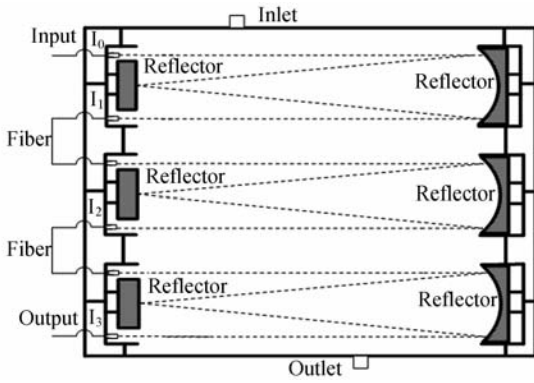


图 2 串联气室结构图

Fig. 2 Structure of series gas cell

### 2.4 空分、时分复用技术

光纤传感中空分复用(Space Division Multiplexing, SDM)指多条光纤共用一条光纤传输的复用方式。本系统利用空分复用技术实现了 3 个传感点的测量,系统中的每一路气体传感器都是独立的,它们共用一个光源,通过光开关进行切换,每个光开关的切换时间小于 1 s。利用此技术还可以实现更多传感点的测量<sup>[18]</sup>。

光纤传感中时分复用(Time Division Multiplexing, TDM)就是将提供给整个光纤信道传输信息的时间划分成若干时间片(简称时隙),并将这些时隙分配给每一个信号源使用,每一路信号在自己的时隙内独占光纤信道进行数据传输。本系统将光源波长扫描技术和时分复用技术相结合,利用信号发生电路调节光源内压电陶瓷,实现单一超窄线宽激光光源分时输出波长为 1 567.32, 1 572.66, 1 650.955 nm 的光信号,每个波长输出均为 3 s,利用此技术实现了单一光源对 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO 多种气体的同时检测<sup>[19]</sup>。

## 3 系统设计

### 3.1 激光光源及波长测定

根据多气体(CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO)检测需要,选用了可调谐超窄线宽激光光源,光源输出稳定,激光功率高,并具有很宽的波长扫描范围。光源光谱如图 3 所示,光谱带宽 < 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 ±1 pm、精确度为 ±1 pm。激光器输出的超窄线宽激光能非常精确地锁定在气体吸收峰中心波长上且带宽远小于单条气体吸收谱线带宽,有

效提高了系统检测精度和灵敏度,并结合超宽扫描范围和时分复用技术实现了单一激光器的多气体检测。

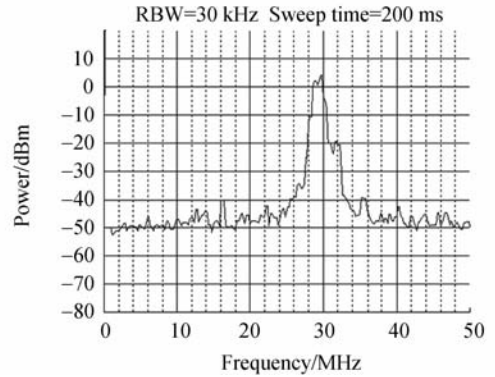


图 3 光源光谱图

Fig. 3 Spectrum of ultra-narrow-linewidth laser

如图 4 所示,设计了可调节信号发生电路用于产生 3 种幅值的周期信号,调节信号发生电路使其分别输出 -1.757, -1.578, 1.032 V 幅值信号。

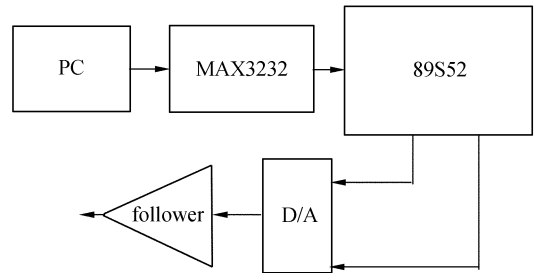


图 4 可调节信号发生电路图

Fig. 4 Frame of adjustable signal circuit

将可调节信号电路接至光源波长扫描端口,光源分时输出波长为 1 567.32, 1 572.66, 1 650.955 nm 的激光,如图 5 所示。

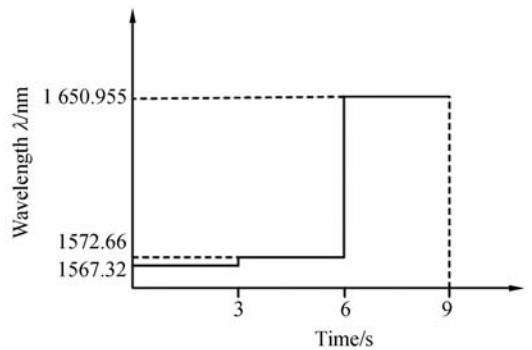


图 5 输出波长示意图

Fig. 5 Chart of laser output wavelength

同时将频率为 5 kHz、幅值为 ±2 V 的三角波信号接入光源调制端口,使光源输出光的强度受到相应调制,实现高频谐波检测,调制信号如图 6 所示。

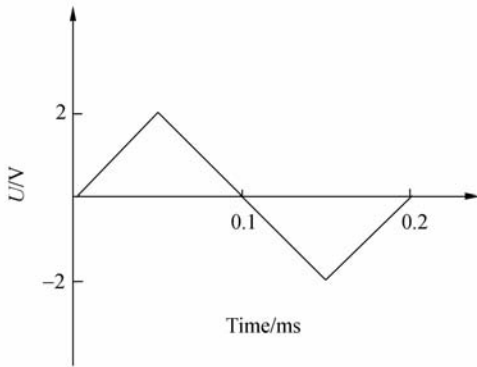


图 6 三角波信号图

Fig. 6 Waveform picture of function generator

### 3.2 传感系统设计

基于单一激光光源的多气体检测系统结构如图 7 所示,其主要由光源、光源控制部分、传感气室、光电转换部分和信号处理部分组成。

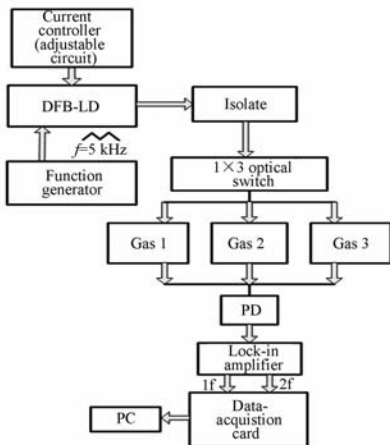


图 7 系统结构图

Fig. 7 Schematic of experiment system

系统选用单一可调谐超窄线宽激光器作为光源,将可调节信号电路和 SP-F40 型函数发生器分别接入波长调节接口和光谱调制接口。调制后的激光经过光隔离器达到光开关,利用光开关空分复用技术实现了 3 个检测点的测量。空分复用系统中的每一路气体传感器都是独立的,它们共用一个光源,通过光开关进行切换,每个光开关的切换时间小于 1 s。光信号通过光开关后端光纤和准直器进入串联结构气室,在 3 个气室中相继

传输后经耦合的尾纤传送到 New focus 光电探测器,光电转换后送到 SR830 数字锁相放大器检测其一次、二次谐波幅值,由数据采集卡采集后传入计算机进行处理、显示。

## 4 实验及结果分析

### 4.1 混合气体浓度检测实验

#### 4.1.1 实验方法

本实验基于单一超窄线宽激光器波长调节特性、光源调制技术和空分复用技术实现了多气体多点检测,实验结构如图 7 所示。将可调节信号发生电路输出接入光源波长扫描调节端口,实现激光器在 1 567.32,1 572.66,1 650.955 nm 波长处周期性扫描,其输出波长分别锁定在 3 种气体 (CO,CO<sub>2</sub>,CH<sub>4</sub>) 的吸收峰值上。同时将频率为 5 kHz 的三角波信号接入光源调制端口,实现输出光强的三角调制。激光通过光隔离器、光开关、准直器、串联气室达到光电探测器,光电转换后锁相放大器测出的二次谐波、一次谐波值通过数据采集系统采集至计算机,多次累加平均后得出所测混合气体浓度值。

#### 4.1.2 实验步骤及结果分析

本系统利用空分复用技术实现了 3 个检测点的测量,这里随机取一个检测点数据进行分析,实验中温度设定恒为 296 K。用洁净的氮气清洗气室并将 5 组不同浓度的标准混合气体 (CO,CO<sub>2</sub>,CH<sub>4</sub>) 分别充入洁净气室,检测系统对不同浓度的标准混合气体进行了测量,并分别拟合了混合气体中 CO,CO<sub>2</sub>,CH<sub>4</sub> 浓度检测曲线,如图 8~10 所示。测得混合气体中 3 种气体浓度与标准浓度线

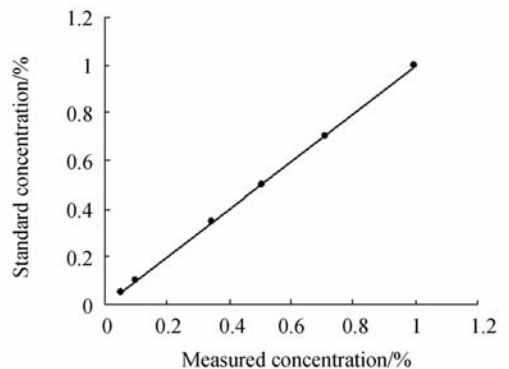


图 8 混合气体中所测 CO 浓度值

Fig. 8 Concentration of CO in multi-component gas detection

性度为 0.99, 测量最大相对误差  $< 2\%$ , 最小浓度检测限分别为  $0.05\%$ ,  $0.05\%$ ,  $0.005\%$ 。

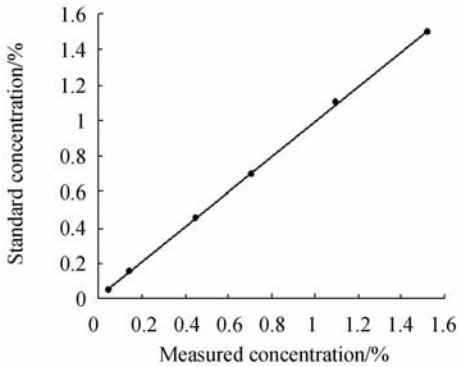


图 9 混合气体中所测  $\text{CO}_2$  浓度值

Fig. 9 Concentration of  $\text{CO}_2$  in multi-component gas detection

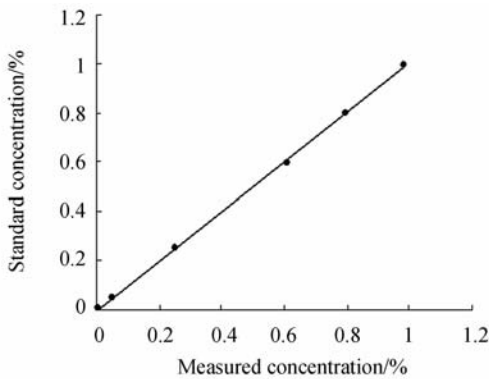


图 10 混合气体中所测  $\text{CH}_4$  浓度值

Fig. 10 Concentration of  $\text{CH}_4$  in multi-component gas detection

#### 4.2 多组分气体检测稳定性实验

用洁净的氮气清洗气室并将  $1\% \text{CO}$ ,  $2\%$

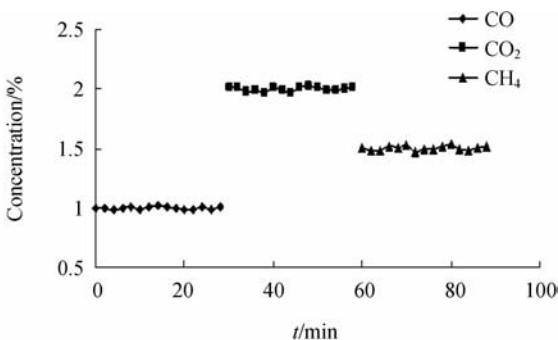


图 11 混合气体检测稳定性曲线

Fig. 11 Experimental curves of stability in multi-component gas detection

$\text{CO}_2$ ,  $1.5\% \text{CH}_4$  一组标准气体充入气室后分别进行系统的稳定性实验, 每隔 2 min 记录一次测量结果, 如图 11 所示, 每种气体在所测 30 min 时间内最大浓度波动均小于  $0.02\%$ , 检测系统具有较好的稳定性和重复性。

#### 4.3 多组分气体检测动态响应实验

用洁净的氮气清洗气室, 测试系统动态响应特性。将气室中注入  $1.5\% \text{CO}$ ,  $2\% \text{CO}_2$ ,  $2.5\% \text{CH}_4$  标准混合气, 打开  $\text{CH}_4$  减压器注入一定体积的  $\text{CH}_4$ , 关闭  $\text{CH}_4$  减压器待测量稳定后打开  $\text{CO}_2$  减压器, 关闭  $\text{CO}_2$  减压器待测量稳定后再打开  $\text{CO}$  减压器充入一定体积的  $\text{CO}$ , 实验结果如图 12 所示, 系统动态响应时间  $< 10 \text{ s}$ , 具有很好的动态响应特性。

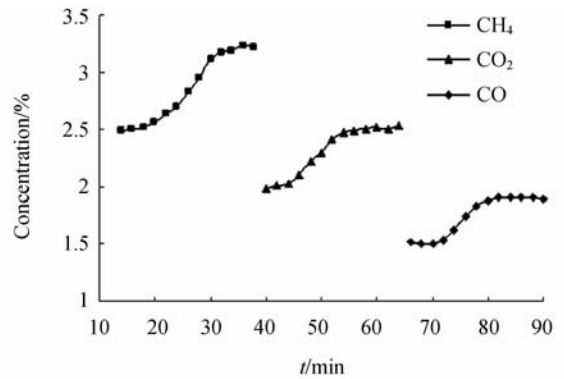


图 12 混合气体检测动态响应曲线

Fig. 12 Dynamic response in multi-component gas detection

## 5 结 论

利用超窄线宽激光器输出光谱能精确稳定地锁定在气体吸收峰内且带宽远小于气体吸收谱线带宽的特性, 结合光源的超宽波长扫描技术, 光谱调制技术和时分、空分复用技术, 设计了新型多组分气体实时在线检测系统, 实现了单一激光器的多气体多点检测。该系统设计了新型串联式结构气室, 具有损耗小、抗震性能好、成本低、易于拆装等特点, 有效提高了系统检测精度和灵敏度。实验结果表明,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  多组分气体浓度测量线性相关度为 0.99; 最大相对误差  $< 2\%$ ; 动态响应时间  $< 10 \text{ s}$ ; 最大波动  $< 0.02\%$ 。该系统具有检测精度高、稳定性好, 动态响应速度快等特点, 适合用于多组分气体实时在线检测, 在电力变压器安全监测等领域具有很好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 许坤,周建华,茹秋实,等. 变压器油中溶解气体在线监测技术与展望[J]. 高压电技术, 2005,31(8):30-35.  
XU K, ZHOU J H, RU Q SH, *et al.*. Development and prospect of transformer oil dissolved gas on-line monitoring technology[J]. *High Voltage Engineering*, 2005,31(8):30-35. (in Chinese)
- [2] DUVAL M. A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers[J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2002,18(3):8-17.
- [3] 阙瑞峰,刘文清,张玉钧,等. 基于可调谐激光吸收光谱的大气甲烷监测仪[J]. 光学学报, 2006,26(1):67-70.  
KAN R F, LIU W Q, ZHANG Y J, *et al.*. Infra-red absorption spectrometer of monitoring ambient methane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006,26(1):67-70. (in Chinese)
- [4] 吴希军,王玉田,刘学才,等. 棱镜气室在光纤甲烷检测系统中的应用研究[J]. 光学学报, 2010,30(5):1261-1267.  
WU X J, WANG Y T, LIU X C, *et al.*. Application research of prism gas cell in fiber optic methane sensing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010,30(5):1261-1267. (in Chinese)
- [5] 丁晖,梁建奇,崔俊红,等. 窄带吸收光谱扫描技术在气体定量检测中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2010,30(3):667-671.  
DING H, LIANG J Q, CUI J H, *et al.*. Application of near-infrared absorption spectrum scanning techniques in gas quantitative measurement [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010,30(3):667-671. (in Chinese)
- [6] MICHEAL E W, SU H K, SCOTT T. In situ combustion measurement of CO<sub>2</sub> by use of a distributed feedback diode laser sensor near 2.0 μm [J]. *Appl. Opt.*, 2001,40(6):821-828.
- [7] 何莹,张玉钧,阙瑞峰,等. 基于激光吸收光谱开放式大气 CO<sub>2</sub> 的在线监测[J]. 光谱学与光谱分析, 2009,29(1):10-13.  
HE Y, ZHANG Y J, KAN R F, *et al.*. Open-path online monitoring of ambient atmospheric CO<sub>2</sub> based on laser absorption spectrum[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009,29(1):10-13. (in Chinese)
- [8] 李政颖,王洪海,程松林,等. 光纤气体传感的双光路相位保持方法[J]. 光学学报, 2009,29(3):728-732.  
LI ZH Y, WANG H H, CHENG S L, *et al.*. Phase-synchronization using double optical-path technology in fiber optic gas sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009,29(3):728-732. (in Chinese)
- [9] 庄须叶,吴一辉,王淑荣,等. 新结构 D 形光纤消逝场传感器[J]. 光学精密工程, 2008,16(10):1936-1941.  
ZHUANG X Y, WU Y H, WANG SH R, *et al.*. Optical fiber evanescent field sensor based on new type D-shaped fiber [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(10):1936-1941. (in Chinese)
- [10] 肖韶荣,朱平,贵富来. 光纤气压传感器特性分析[J]. 光学精密工程, 2008,16(6):1042-1046.  
XIAO SH R, ZHU P, BEN F L. Analysis on characteristics of optical fiber sensor for atmospheric pressure[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(6):1042-1046. (in Chinese)
- [11] 赵笑笑,云玉新,陈伟根. 变压器油中溶解气体的在线监测技术评述[J]. 电力系统保护与控制, 2009,37(23):187-191.  
ZHAO X X, YUN Y X, CHEN W G. Comment on on-line monitoring techniques for dissolved gas in transformer oil[J]. *Power System Protection and Control*, 2009,37(23):187-191. (in Chinese)
- [12] 赵建华,赵崇文,魏周君,等. 基于近红外光谱技术的多组分毒性气体检测研究[J]. 光学学报, 2010,30(2):567-572.  
ZHAO J H, ZHAO CH W, WEI ZH J, *et al.*. Study on monitoring multi-component toxic gases based on near-infrared spectroscopic method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010,30(2):567-572. (in Chinese)
- [13] 陈东,刘文清,张玉钧. 可调谐半导体激光光谱火灾气体探测系统[J]. 中国激光, 2006,33(11):1553-1556.  
CHEN D, LIU W Q, ZHANG Y J. Tunable diode laser spectroscopy system for fire gases sensing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006,33(11):1553-1556. (in Chinese)
- [14] 崔厚欣,齐汝宾,陈文亮,等. 可调谐激光波长调制技术检测氧气浓度[J]. 中国激光, 2008,35(10):1558-1562.  
CUI H X, QI R B, CHEN W L, *et al.*. Measurement of oxygen concentration using tunable diode laser absorption spectroscopy and wavelength mod-

- ulation spectroscopy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, 35(10):1558-1562. (in Chinese)
- [15] 李亚萍,张广军,李庆波,等. 空间双光路红外 CO<sub>2</sub> 气体传感器及其测量模型[J]. *光学精密工程*, 2009,17(1):14-19.  
LI Y P, ZHANG G J, LI Q B, *et al.*. Infrared CO<sub>2</sub> gas sensor based on space double beams and its measurement model[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(1):14-19. (in Chinese)
- [16] 田卡丽. 红外光谱吸收型光纤一氧化碳传感器研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2008.  
TIAN K L. *Study on Infrared Absorption CO Fiber Optic Sensor* [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [17] 乔学光,王佳,贾振安,等. 光纤 CH<sub>4</sub> 气体传感器的实验研究[J]. *光电子·激光*, 2009,20(7):851-854.  
QIAO X G, WANG J, JIA ZH A, *et al.*. Experiment research for fiber methane gas sensor[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009,20(7):851-854. (in Chinese)
- [18] 李丽,林玉池,付鲁华,等. 光纤光栅空分复用传感系统的研究[J]. *光学精密工程*, 2007,15(4):473-477.  
LI L, LIN Y CH, FU L H, *et al.*. Research on spatial division multiplexing of fiber Bragg grating sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(4):473-477. (in Chinese)
- [19] 张记龙,王鹏,王志斌,等. 基于空分复用的矿井瓦斯浓度光纤检测网络研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010,30(6):1722-1726.  
ZHANG J L, WANG P, WANG ZH B, *et al.*. Fiber monitoring network of methane concentration based on space division multiplexing in coal mine [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010,30(6):1722-1726. (in Chinese)

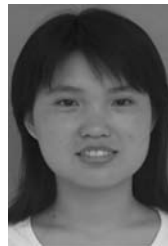
#### 作者简介:



陈霄(1985—),男,江苏连云港人,博士研究生,2007年于山东大学获得学士学位,主要从事光电子技术,光纤传感技术等方面的研究。E-mail: cx\_012003@yahoo.com.cn



苗飞(1979—),男,山东淄博人,博士研究生,2003年于东南大学获得学士学位,主要从事光电子技术,光纤传感技术等方面的研究。E-mail: mr\_miaofei@mail.sdu.edu.cn



王静(1983—),女,山东聊城人,博士研究生,2005年于吉林大学获得学士学位,主要从事光电子技术,光纤传感技术等方面的研究。E-mail: wangjing329@mail.sdu.edu.cn

#### 导师简介:



隋青美(1963—),女,山东东营人,博士,教授,博士生导师,1983年、1986年于山东工业大学分别获得学士、硕士学位,2001年于天津大学获得博士学位,主要从事检测理论与应用,光纤传感技术等方面的研究。E-mail: qmsui@sdu.edu.cn