

激光与光电子学进展

基于电光双光梳光谱的气体含量测量方法研究

王杰¹, 刘睿¹, 廖文龙¹, 任心仪^{2*}, 马慧², 闫明², 曾和平², 黄勤清³, 程林³¹国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;²华东师范大学重庆研究院, 重庆 401121;³国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074

摘要 双光梳光谱是实现高分辨光谱分析的重要工具, 其因相干特性依赖于复杂、庞大的频率锁定与反馈系统, 导致成本高昂且对环境扰动敏感, 应用领域受限。基于电光频率梳的双光梳系统具有装置简单、频率捷变及相干性高等优势, 有利于外场的应用, 但其在气体检测应用中的含量反演精度及实时性仍有待验证。为此, 搭建了高相干电光双光梳系统, 并利用多通气体池实现了 CO 和 CO₂ 气体吸收光谱测量, 其结果与 HITRAN 数据库仿真结果一致。光谱分辨率达 200 MHz, 单次刷新时间仅为 4 μs。实验通过对 CO₂ 吸收峰的含量反演与多峰拟合, 将含量不确定度缩小至 2.86%。此外, 通过对 CO 吸收光谱的快速检测, 验证了系统对混合气体含量监测的实时性, 该系统有望应用于电力设备故障特征气体的实时监测。

关键词 分子光谱; 电光; 频率梳; 双光梳光谱; 气体检测

中图分类号 O433

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222318

Study on Electro-Optic Dual-Comb Spectroscopy for Gas Concentration Measurement

Wang Jie¹, Liu Rui¹, Liao Wenlong¹, Ren Xinyi^{2*}, Ma Hui², Yan Ming², Zeng Heping², Huang Qinqing³, Cheng Lin³¹Power Science Research Institute of State Grid, Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;²Chongqing Institute of East China Normal University, Chongqing 401121, China;³Wuhan NARI Co., Ltd., State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, Hubei, China

Abstract Dual-comb spectroscopy is an important tool for performing high-resolution spectral analysis. However, its coherence depends on complex and huge frequency-locking and feedback systems. Thus, the implementation of this technique is expensive and the system is sensitive to environmental disturbances; consequently, the applications of this tool are limited. A dual-comb system based on an electro-optic frequency comb has the advantages of a simple device, frequency agility, high coherence, and conduciveness to field applications. However, its accuracy and real-time performance for concentration inversion in gas detection applications still need to be verified. Therefore, a highly coherent electro-optic dual-comb system was constructed in this study. The absorption spectra of CO and CO₂ were measured by using a multipass gas cell. The results are consistent with the simulation data of the HITRAN database. The spectral resolution reaches 200 MHz, and the single refresh time is only 4 μs. The concentration uncertainty of CO₂ absorption peaks is reduced to 2.86% by concentration inversion and multipeak fitting. In addition, the real-time performance of the system for monitoring the concentration of a gas mixture is verified through the rapid detection of the CO absorption spectrum. The system is expected to be applied to the real-time monitoring of the fault characteristic gases of power equipment.

Key words molecular spectroscopy; electro-optic; frequency comb; dual-comb spectroscopy; gas detection

1 引言

光学频率梳(光梳)作为一种相干光源,其在时间

域表现为载波包络相位稳定的超短脉冲序列,而在频率域则为等间距分布的窄线宽频率梳齿。光梳技术促进了精密光谱测量领域的发展,其中双光梳光谱

收稿日期: 2022-07-17; 修回日期: 2022-08-18; 录用日期: 2022-09-05; 网络首发日期: 2022-09-15

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(52199920002S)

通信作者: *18717827913@163.com

(DCS)技术发展迅猛,其利用2台重复频率略有差别的光梳在高速光电探测器上进行光外差探测,可在无需机械扫描与色散元件的情况下,实现宽带高分辨分子光谱的快速测量。因此,DCS被广泛应用于大气遥感、痕量分析、工业气体监测等领域^[1-7]。近十年,光纤光源技术的发展拓展了DCS外场应用领域^[6]。2019年,Ycas等^[7]利用基于光纤光梳的DCS系统实现了1 km范围内的气体遥感,对油田区域天然气挥发物含量进行实时监测,探测灵敏度达亚十亿分之一量级。

另一方面,变压器电力设备故障特征气体(如CH₄、C₂H₂、CO、CO₂等)的快速检测是光谱技术一个重要应用领域,对变压器等电力设备故障诊断以及运行状态评价至关重要^[8-10]。然而,现有电力设备故障气体检测方法如气相色谱法^[11-13]或傅里叶红外光谱法^[14]等,存在单点采样、检测时间滞后,或光谱分辨率有限(受限于扫描臂长度)、测量时间长等问题。DCS能够有效避免上述问题,并有望为电力故障特征气体的高分辨、实时检测提供新途径。

然而,基于锁模原理的光纤光梳对环境(温度、振动)敏感,需要复杂的稳频锁相系统来保持高相干性^[15-17],因此增加了系统复杂度与成本。基于铌酸锂波导调制器的电光(EO)光梳技术为经济实用型DCS系统提供了新方法^[18-26]。在电光光梳DCS(EODCS)测量中,2台电光梳的中心频率溯源至同一个稳频连续光源,因此无需额外的锁频系统,即可具备高相干性与抗干扰能力,更适用于外场环境。目前,EODCS研究主要集中于高分辨光谱测量。例如:2016年,Millot等^[20]报道了基于单强度调制器的近红外EODCS系统,验证了其高分辨率、高频谱精度及快速测量的优势;2017年,Yan等^[21]在此基础上采用非线性差频技术实现了C₂H₂、CH₄气体中红外光谱的高分辨测量;2018年,Wang等^[22]利用准整数倍重频关系的EO光梳,实现了光学分辨率达1 MHz的超高分辨透射光谱测量。然而,在气体检测应用方面,EODCS在气体含量反演分析中的测量精度及实时性仍有待验证。

为此,本文基于EODCS技术研制了一种简单、实用的气体传感系统,并针对CO与CO₂两种特征气体开展了多特征峰快速测量与气体含量反演研究。系统采用了基于单强度调制器的光梳产生方式,极大地降低了成本与复杂度,并利用多通气体腔结构,增加了光谱的有效光程。实验结果表明,系统能够实现气体含量的精确分析与实时监测。实验中,同一气压下含量的相对不确定度为2.86%,且单次成谱时间仅为4 μs,该系统有望应用于电力设备故障气体的快速检测。

2 基本原理

2.1 双光梳光谱技术

此电光梳是由单频光的低频强度调制产生的。调

制后,在单频光频率 f_{CW} 两侧产生新的频率边带,且边带间隔与调制频率一致。如图1所示,电光梳1作为信号光梳,其重复频率为 f_r ,电光梳2作为本振光梳,其重复频率为 $f_r + \Delta f$, Δf 为两台电光梳的重复频率差, f_{AOM} 为电光梳2的光频偏置频率。双光梳的电场表达式 E_{n1} 、 E_{n2} 分别为

$$E_{n1} = A \cos[2\pi(f_{CW} + nf_r)t], \quad (1)$$

$$E_{n2} = A \cos\{2\pi[f_{CW} + n(f_r + \Delta f) - f_{AOM}]t\}, \quad (2)$$

式中: A 为电场振幅, n 为梳齿编号,其值为整数; t 为时间。双光梳拍频后,每个梳齿对应的光电流 I_n 可表示为

$$I_n \propto \cos[2\pi(f_{AOM} + n\Delta f)t], \quad (3)$$

经过光外差探测,梳齿的光频信息被一一映射至射频域,其梳齿表达式为

$$f_n = f_{AOM} + n\Delta f, \quad (4)$$

即,射频梳齿的中心频率为 f_{AOM} ,梳齿间隔为重复频率差 Δf ,对应时域干涉信号的周期为 T , $T = 1/\Delta f$ 。当信号光梳经过待测气体时,其梳齿强度被气体吸收线型调制。拍频后,光频与气体相互作用的信息被转换到射频域,采用光电探测器和数据采集卡记录射频谱,并反映至光频,即可获得光频吸收光谱信息,实现分子光谱的测量。

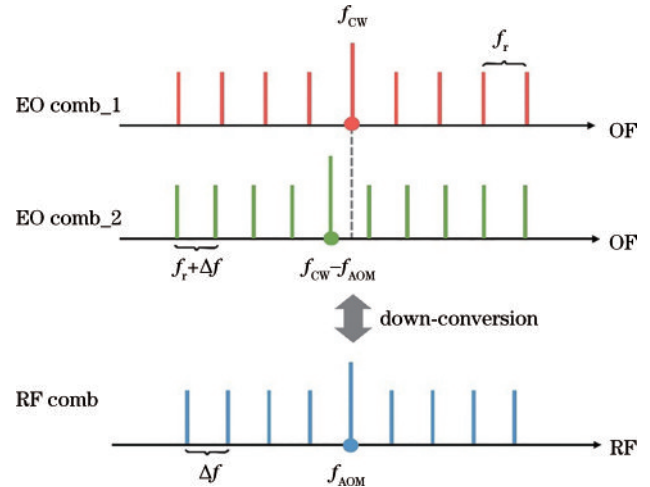


图1 EODCS的频域多外差探测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of multiheterodyne detection in frequency domain of EODCS

2.2 含量测量原理

气体含量测量基于朗伯比尔定律。当一束波数为 ν 、强度为 $I_0(\nu)$ 的单色光穿过气体分子时,透射光光强由于吸收而衰减至 $I(\nu)$,则透射率 T_ν 为

$$T_\nu = I(\nu)/I_0(\nu) = \exp[-\alpha(\nu) \cdot N \cdot L], \quad (5)$$

式中: $\alpha(\nu)$ 为吸收系数; N 、 L 分别为气体分子数密度、吸收长度。在吸收峰对应的波数范围内 $[\nu_1, \nu_2]$,对吸收系数 $\alpha(\nu)$ 求定积分即对应该吸收峰的线强度 S ,可表示为

$$S = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \alpha(\nu) d\nu, \quad (6)$$

结合式(5)、式(6),得到分子数密度 N 的表达式为

$$N = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \ln[I(\nu)/I_0(\nu)] d\nu}{S \cdot L} = \frac{A_{\text{abs}}}{S \cdot L}, \quad (7)$$

式中: A_{abs} 为积分光谱吸收系数。理想气体公式建立了 N 与压强 P 的关系:

$$P = N \cdot k \cdot T_{\text{temp}}, \quad (8)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数,其值为 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/k}$; T_{temp} 为气体热力学温度。将式(7)代入式(8)可得目标气体的压强^[27]。假设气体池中的总压强为 P_{total} ,则其含量 C 可表示为

$$C = P/P_{\text{total}} \quad (9)$$

3 实验装置

EODCS 测量装置如图 2 所示,光源部分采用一台 L 波段的窄线宽连续激光器 (CW, LTL-500, LaseGen),其波长调谐范围为 1570~1610 nm,覆盖了待测气体 CO、CO₂ 的部分泛音区吸收谱线。经放大后,CW 激光功率由 10 mW 被放大至 150 mW。使用 50:50 的光纤耦合器 OC₁ 将 CW 光分为两路,并分别注入 2 个带宽为 40 GHz 的强度调制器 (IM, MXAN-LN-

40, Photline) 产生电光梳。为确保外差探测后光频和射频梳齿的映射关系以及避免射频的零频噪声,本振光路的激光经过声光移频器 (AOM) 移频后再进行调制。AOM 的驱动频率为 100 MHz,由射频信号发生器 (SG, SMC100A, Rohde&Schwarz) 供给。2 台光梳的重复频率由 IM 的驱动频率决定,受射频源限制,其调谐范围覆盖 9 kHz~1 GHz。实验中信号光重复频率 f_r 和双光梳重复频率差 Δf 分别设置为 200 MHz 和 0.25 MHz。调制后,IM 输出两路脉宽为 30 ps 的光脉冲信号,其功率均为 100 μW 。双光梳分别被 10:90 的光纤耦合器 OC₂、OC₃ 分为 2 个支路,其中弱光支路经 2×2 的光纤耦合器 OC₄ 合束后接入平衡探测器 BPD₁ 作为参考信号,一强光支路经气体池后与另一强光支路合束 (OC₅),并接入平衡探测器 BPD₂ 作为吸收信号。由于强度调制深度有限,光梳中包含部分未被调制的 CW 光信号。实验中选用交流耦合平衡放大光电探测器 (BPD, PDB480C-AC, Thorlabs) 抑制 CW 激光。式(5)表明吸光度与吸收长度成正比,因此这里采用多通气体池将光与气体分子相互作用长度延长至 10 m,以获取高灵敏气体吸收光谱^[19,28]。最后,2 个 BPD 的输出信号由数据采集卡 (ATS9626, AlazarTech) 记录,其采样频率设置为 250 MSa/s,可确保参考信号与吸收信号的射频谱信息完整采集。

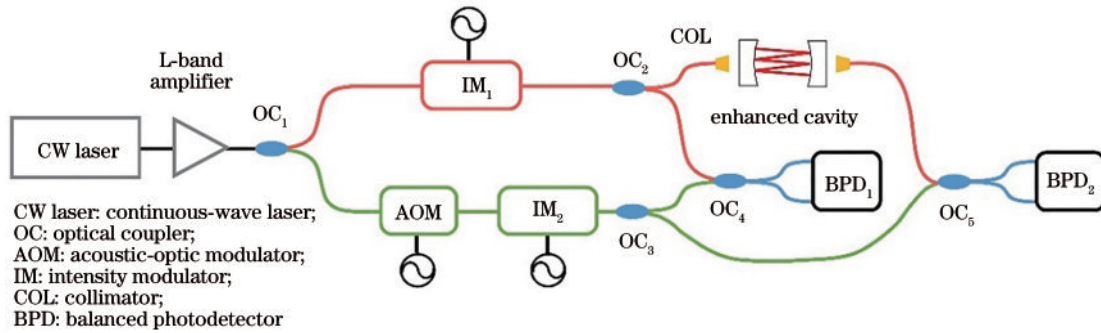


图 2 EODCS 实验装置图
Fig. 2 Diagram of EODCS experimental setup

4 结果与分析

4.1 系统特性

吸收光谱的线型参数会影响含量测量结果的准确性与一致性。因此,光谱分辨率、测量时间、双光梳系统的相干性以及强度抖动作为线型影响因素,需经过合理的设置与检测。为消除光源的强度抖动,实验中设置参考光路实时监测。图 3(a)展示了参考光路的光外差干涉信号,其时间长度为 0.028 ms,干涉信号的周期即光谱刷新率为 4 μs 。采集 4 ms 的时域信号并进行傅里叶变换,可得射频谱图,如图 3(b)所示。射频梳的中心 (100 MHz) 与梳齿间隔 (0.25 MHz) 分别对应偏置频率 f_{AOM} 和重复频率差 Δf ,其梳齿根数超过 180 根。光谱分辨率由光频梳齿间隔决定,实验中设置为

200 MHz (1.6 pm),较商用光谱仪参数提升 1~2 个量级。单次测量中光梳谱宽为 36 GHz,受限于 IM 带宽。

为了表征双光梳系统相干特性,实验中记录了不同测量时间下的拍频信号,并计算其射频域的信噪比。信噪比的计算方法是在线性坐标下,采用梳齿强度除以底噪的标准方差,测量时间与信噪比的关系曲线如图 4 所示 (R_{SN} 为信噪比, τ 为采集时间)。在 100 s 的积分时间内,信噪比随时间呈现递增趋势。在横纵坐标均为对数坐标下,曲线斜率为 0.499,表明信噪比随 $\tau^{1/2}$ 线性变化,由此推测,该系统的相干时间在 100 s 以上,较长的平均时间有利于提高频谱信噪比^[29]。

4.2 分子光谱测量

在验证性实验中,基于上述系统采用多通气体池进行双光梳光谱测量。池中充入 0.645 atm (101325 Pa) 的

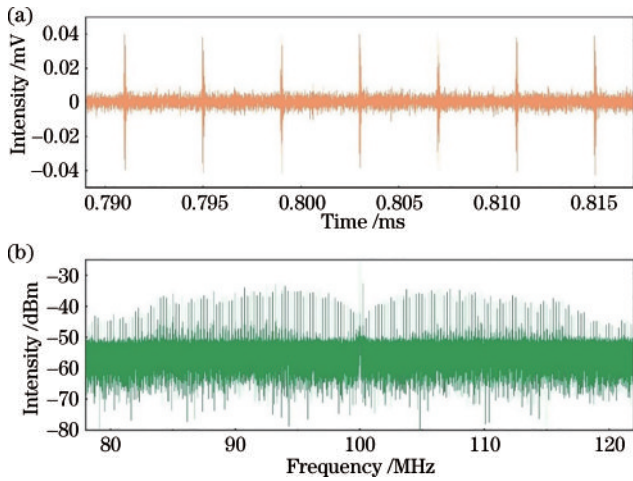


图 3 双光梳的时频域特性。(a)时域外差干涉信号;(b)傅里叶变换后的射频谱

Fig. 3 Time and frequency domain characteristics of dual-comb system. (a) Heterodyne interferograms in the time domain; (b) Fourier-transformed radio frequency spectrum

CO₂气体,气体温度为 296.15 K,电光梳的中心波长由 CW 激光控制,可根据吸收峰的位置进行调谐。采用数据采集卡同时记录吸收信号与背景信号,归一化后,即可得到 CO₂对应的透射光谱。图 5(a)展示了 CO₂在 6361.91~6365.35 cm⁻¹波段的吸收谱,通过调谐 CW

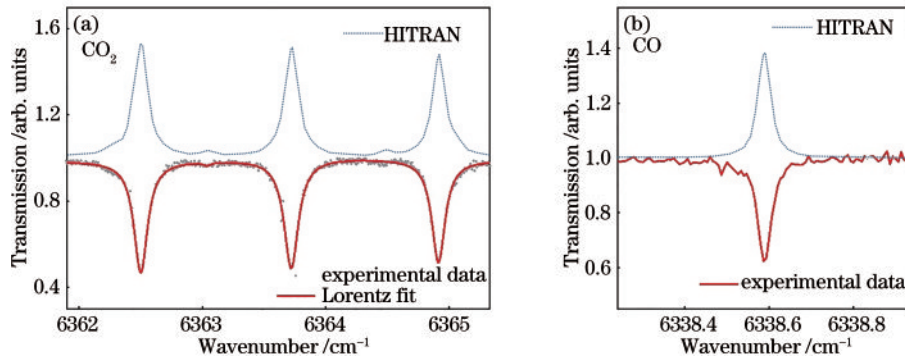


图 5 不同气体的归一化双光梳光谱与 HITRAN 仿真数据对比。(a)CO₂在 6361.91~6365.35 cm⁻¹波段;(b)CO在 6338.59 cm⁻¹波段

Fig. 5 Comparison between normalized dual-comb spectra and the HITRAN simulation data of different gases.

(a) CO₂ during 6361.91~6365.35 cm⁻¹; (b) CO at 6338.59 cm⁻¹

4.3 含量测量

根据式(7),含量测量主要是计算积分光谱吸收系数 A_{abs} ,即需测量入射光强 $I_0(\nu)$ 与出射光强 $I(\nu)$,这 2 个参数可通过归一化以及拟合吸收谱获取。此外,还需已知样品气体的热力学温度 T_{temp} 、吸收长度 L 以及气体对应线型谱线的吸收强度 S 。其中,吸收强度通过 HITRAN 数据库得到。实验中,在气体池中充入 0.65 atm 的 CO₂和 N₂混合气体。其中,CO₂的含量为 49%,测量过程中气体温度为 296.15 K。为获得更准确的含量值,选用了多吸收峰测量与反演方法,测得 CO₂在 6364.92 cm⁻¹、6363.72 cm⁻¹、6362.50 cm⁻¹、6355.94 cm⁻¹、6341.39 cm⁻¹、6337.99 cm⁻¹、6334.46 cm⁻¹、6330.82 cm⁻¹、6327.06 cm⁻¹处的 9 个吸收峰,通过

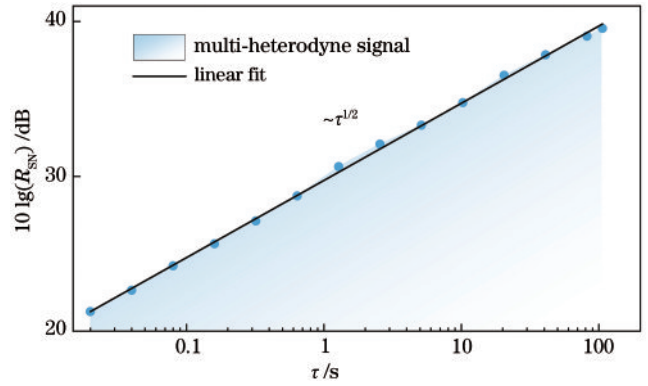


图 4 信噪比随采集时间的变化

Fig. 4 Signal-to-noise ratio as a function of acquisition duration

激光频率合成。每个吸收峰均通过对 4 ms 的时域信号(1000 个干涉周期)进行傅里叶变换得到。该结果与 HITRAN 数据库的仿真结果保持较好的一致性。此外,实验中测试了 CO 在 0.18 atm 气压下的吸收峰并与 HITRAN 数据进行了对比,吸收峰对应的波数为 6338.59 cm⁻¹,如图 5(b)所示。2 种气体的吸收光谱结果表明,该系统可用于不同气压环境下的气体检测,并且与理论谱线线型较为符合。在低气压测量中,可通过进一步降低重复频率实现多普勒极限的高分辨光谱测量。

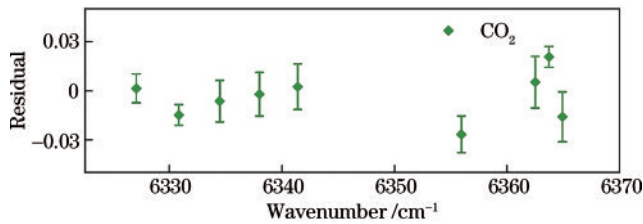
Lorentz 线型拟合后求得每个吸收峰对应的 A_{abs} 以及含量结果,相关参数如表 1 所示。9 个吸收峰对应含量值的一致性较好,其相对标准差为 2.86%。

此外,实验中还对 CO₂的吸收峰进行多次测量,上述 9 个吸收峰的计算结果与真实值之间的偏差以及每个吸收峰对应含量值的离散程度(每个吸收峰处数据代表相同波数下 10 次计算结果),如图 6 所示。由图 6 可知,最大的含量不确定度为 1.525%,平均不确定度为 1.1%,与真值的误差范围为 0.0267,表明该系统在计算气体含量方面具备较好的准确性和一致性。

为了验证该系统用于实时气体监测的能力,选取 CO 在 6364.77 cm⁻¹处的吸收谱线进行光谱测量。实

表 1 CO₂的含量测量结果Table 1 Measured concentration of CO₂

| Absorption peak /cm ⁻¹ | L /cm | S / (10 ⁻²³ cm ⁻¹ ·mol ⁻¹ ·cm ²) | T _{temp} /K | A _{abs} /cm ⁻¹ | N / (10 ¹⁸ mol·cm ⁻³) | C |
|-----------------------------------|-------|---|----------------------|------------------------------------|--|--------|
| 6327.06 | 1000 | 1.29 | 296.15 | 0.1006 | 7.81 | 0.4913 |
| 6330.82 | 1000 | 1.52 | 296.15 | 0.1150 | 7.56 | 0.4751 |
| 6334.46 | 1000 | 1.62 | 296.15 | 0.1248 | 7.69 | 0.4835 |
| 6337.99 | 1000 | 1.53 | 296.15 | 0.1183 | 7.75 | 0.4876 |
| 6341.39 | 1000 | 1.20 | 296.15 | 0.0939 | 7.82 | 0.4919 |
| 6355.94 | 1000 | 1.55 | 296.15 | 0.1142 | 7.36 | 0.4628 |
| 6362.50 | 1000 | 1.64 | 296.15 | 0.1291 | 7.87 | 0.4949 |
| 6363.72 | 1000 | 1.52 | 296.15 | 0.1236 | 8.11 | 0.5102 |
| 6364.92 | 1000 | 1.38 | 296.15 | 0.1042 | 7.53 | 0.4737 |

图 6 CO₂不同吸收峰的含量测量Fig. 6 Concentration measurement of CO₂ different absorption peaks

验中,测试了总气压在 1000 Pa 下不同含量 CO 的吸收光谱,如图 7(a)、图 7(b)所示,通过上述方法计算出 CO 含量值分别为 36% 和 74.5%。含量提升使得光谱透射率变低。随后,向气体池中充入未知含量的 CO 与 N₂ 混合气体,并记录对应的参考信号与吸收信号。处理后的归一化透射谱如图 7(c)、图 7(d)所示,每个吸收谱仅耗时 4 ms。随着总气压的升高(1000~18000 Pa,气压计测量值),在碰撞加宽影响下,吸收谱线变宽;同时随着 CO 分子数增多,透射率下降。通过式(7)、式(8),推算出图 7(c)、图 7(d)对应的 CO 气体含量分别为 42.9%、45.0%。

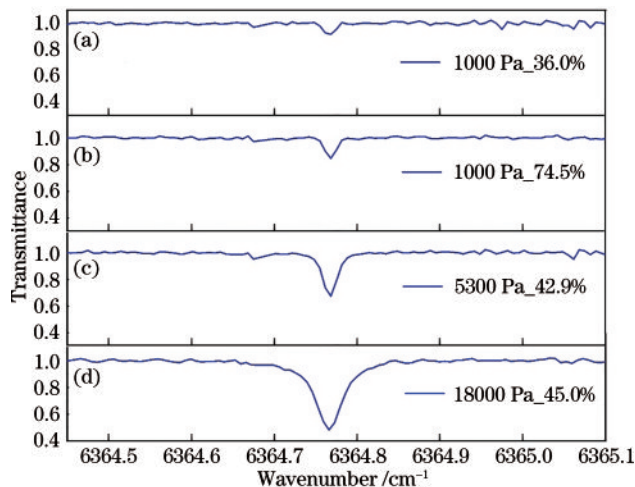


图 7 CO 的含量演变过程

Fig. 7 Evolution of CO concentration

5 结 论

研究了基于电光双光梳光谱技术的气体含量测量方法,利用 EODCS 系统实现高分辨(200 MHz)、快速(4 μs)的光谱测量。结合朗伯比尔定律与理想气体公式,实现了气体含量分析。实验中测得 CO₂ 的 9 个吸收峰光谱,经过拟合与含量计算后得到含量测量相对标准差为 2.86%。此外,通过对 CO 气体含量的监测,验证了 EODCS 系统对气体含量信息的实时反馈性能,为推进高分辨光梳光谱技术在电力设备故障气体测量领域的应用提供了技术参考。

参 考 文 献

- [1] Giaccari P, Deschènes J D, Saucier P, et al. Active Fourier-transform spectroscopy combining the direct RF beating of two fiber-based mode-locked lasers with a novel referencing method[J]. Optics Express, 2008, 16(6): 4347-4365.
- [2] Ideguchi T, Poisson A, Guelachvili G, et al. Adaptive real-time dual-comb spectroscopy[J]. Nature Communications, 2014, 5(1): 3375.
- [3] Okubo S, Iwakuni K, Inaba H, et al. Ultra-broadband dual-comb spectroscopy across 1.0–1.9 μm[J]. Applied Physics Express, 2015, 8(8): 082402.
- [4] Schroeder P J, Wright R J, Coburn S, et al. Dual frequency comb laser absorption spectroscopy in a 16 MW gas turbine exhaust[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(3): 4565-4573.
- [5] 路桥, 时雷, 毛庆和. 双光梳光谱技术研究进展[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0400001. Lu Q, Shi L, Mao Q H. Research advances in dual-comb spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0400001.
- [6] 杨昌喜, 赵康俊, 曹博, 等. 单腔双光梳锁模光纤激光器及其应用研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1501001. Yang C X, Zhao K J, Cao B, et al. Recent progress of single-cavity dual-comb mode-locked fiber lasers and their applications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1501001.

- [7] Ycas G, Giorgetta F R, Cossel K C, et al. Mid-infrared dual-comb spectroscopy of volatile organic compounds across long open-air paths[J]. *Optica*, 2019, 6(2): 165-168.
- [8] Bustamante S, Manana M, Arroyo A, et al. Dissolved gas analysis equipment for online monitoring of transformer oil: a review[J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4057.
- [9] de Faria H, Jr, Costa J G S, Olivás J L M. A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 46: 201-209.
- [10] 李梦醒. 变压器油中溶解气体监测系统研究及应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 1-5.
Li M X. Research and application of transformer oil dissolved gas monitoring system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017: 1-5.
- [11] Fan J M, Wang F, Sun Q Q, et al. SOFC detector for portable gas chromatography: high-sensitivity detection of dissolved gases in transformer oil[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, 24(5): 2854-2863.
- [12] Fan J M, Liu Z, Meng A B, et al. Characteristics of tin oxide chromatographic detector for dissolved gases analysis of transformer oil[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 94012-94020.
- [13] 赵君娇, 袁彤哲, 唐红, 等. 变压器油中溶解气体在线监测装置现场检验方法的研究[J]. *东北电力技术*, 2019, 40(7): 43-46.
Zhao J J, Yuan T Z, Tang H, et al. Research on field accuracy calibration method of transformer chromatography on-line monitoring device[J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2019, 40(7): 43-46.
- [14] Adler F, Masłowski P, Foltynowicz A, et al. Mid-infrared Fourier transform spectroscopy with a broadband frequency comb[J]. *Optics Express*, 2010, 18(21): 21861-21872.
- [15] Baumann E, Giorgetta F R, Swann W C, et al. Spectroscopy of the methane ν_3 band with an accurate midinfrared coherent dual-comb spectrometer[J]. *Physical Review A*, 2011, 84(6): 062513.
- [16] Coddington I, Swann W C, Newbury N R. Coherent dual-comb spectroscopy at high signal-to-noise ratio[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(4): 043817.
- [17] 陆诗雨, 郝强, 刘婷婷, 等. 基于非线性环形镜锁模的全保偏光纤光梳系统[J]. *中国激光*, 2021, 48(21): 2101002.
Lu S Y, Hao Q, Liu T T, et al. All polarization maintaining fiber-based optical comb system with nonlinear loop mirror mode-locking[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(21): 2102002.
- [18] Parriaux A, Hammani K, Millot G. Electro-optic frequency combs[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(1): 223-287.
- [19] Long D A, Fleisher A J, Douglass K O, et al. Multiheterodyne spectroscopy with optical frequency combs generated from a continuous-wave laser[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(9): 2688-2690.
- [20] Millot G, Pitois S, Yan M, et al. Frequency-agile dual-comb spectroscopy[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(1): 27-30.
- [21] Yan M, Luo P L, Iwakuni K, et al. Mid-infrared dual-comb spectroscopy with electro-optic modulators[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(10): e17076.
- [22] Wang S, Fan X Y, Xu B X, et al. Fast MHz spectral-resolution dual-comb spectroscopy with electro-optic modulators[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(1): 65-68.
- [23] Guay P, Genest J, Fleisher A J. Precision spectroscopy of $H^{13}CN$ using a free-running, all-fiber dual electro-optic frequency comb system[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1407-1410.
- [24] Martín-Mateos P, Jerez B, Largo-Izquierdo P, et al. Frequency accurate coherent electro-optic dual-comb spectroscopy in real-time[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 9700-9713.
- [25] 刘鹏飞, 任麟昊, 闻浩, 等. 集成电光频率梳研究进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(5): 20220381.
Liu P F, Ren L H, Wen H, et al. Progress in integrated electro-optic frequency combs(Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(5): 20220381.
- [26] 张馨, 殷科, 张江华, 等. 高平坦大带宽 25 GHz 双光频梳源[J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1116002.
Zhang X, Yin K, Zhang J H, et al. High bandwidth 25 GHz dual optical frequency comb source[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1116002.
- [27] Li D T, Ren X Y, Yan M, et al. Rapid and precise partial pressure measurement of multiple gas species with mid-infrared electro-optic dual-comb spectroscopy[J]. *Optik*, 2021, 242: 167341.
- [28] Zolot A M, Giorgetta F R, Baumann E, et al. Direct-comb molecular spectroscopy with accurate, resolved comb teeth over 43 THz[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 638-640.
- [29] Chen Z J, Yan M, Hänsch T W, et al. A phase-stable dual-comb interferometer[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 3035.