

引用本文: 闫星宇, 傅海威, 雍振, 等. 光声光谱气体检测系统中光声池的仿真优化设计[J]. 光通信技术, 2023, 47(3): 86–90.

光声光谱气体检测系统中光声池的仿真优化设计

闫星宇, 傅海威*, 雍 振, 王晓玲, 张 泽, 赵子良

(西安石油大学 理学院, 西安 710000)

摘要: 针对特定场合对光声光谱气体检测系统中光声池特征频率的设计需求, 利用有限元分析法, 以一阶圆柱形共振光声池为研究对象进行声学模态仿真, 获得了前 8 阶声学模态; 仿真分析谐振腔、缓冲室的半径和长度对光声池特征频率和光声信号强度的影响。仿真结果表明: 当谐振腔半径为 3 mm 时, 谐振腔长度为 120 mm, 缓冲室的半径、长度分别为 14.7 mm、60 mm 是光声池特征频率在 1 400 Hz 附近的最佳尺寸。

关键词: 光声光谱; 光声池; 特征频率; 光声信号强度

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)03-0086-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.03.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Simulation and optimization design of photoacoustic cell in photoacoustic spectroscopy gas detection system

YAN Xingyu, FU Haiwei*, YONG Zhen, WANG Xiaoling, ZHANG Ze, ZHAO Ziliang

(School of Science, Xi'an Petroleum University, Xi'an 710000, China)

Abstract: In view of the design requirements of the characteristic frequency of the photoacoustic cell in the photoacoustic spectroscopy gas detection system in specific occasions, the first eight acoustic modes are obtained by using the finite element analysis method and taking the first order cylindrical resonant photoacoustic cell as the research object. This paper simulates and analyzes the influence of the radius and length of the resonant cavity and buffer chamber on the characteristic frequency and photoacoustic signal strength of the photoacoustic cell. The simulation results show that when the radius of the resonant cavity is 3 mm, the length of the resonant cavity is 120 mm, and the radius and length of the buffer chamber are 14.7 mm and 60 mm respectively, which are the optimal dimensions for the characteristic frequency of the photoacoustic cell around 1 400 Hz.

Key words: photoacoustic spectroscopy, photoacoustic cell, characteristic frequency, intensity of photoacoustic signal

0 引言

痕量气体检测在生态农业^[1]、医疗诊断^[2]、大气环境^[3]等众多领域发挥着重要作用。在现有的气体检测技术中, 光声光谱技术凭借其抗电磁干扰、高灵敏度、高分辨率等特性得到广泛关注。

光声光谱技术的原理是利用光波对物质产生的影响来研究物质的光学和声学特性。在光声光谱实验

中, 通过改变光波的波长或强度来表示光学效应, 而声学效应通过物质内部产生的声波来表现。光声池是光声效应的载体, 分为共振式和非共振式 2 种。非共振式光声池的光调制频率在几赫兹到几十赫兹之间, 远低于光声池的最低共振频率, 并且不会出现光声信号的共振放大、信噪比较低等情况^[4]。当光调制频率等于光声池的固有频率时称为共振式光声池, 这类光声池可以将产生的光声信号放大, 其频率在千赫兹范围内, 可以减少环境噪声和电子装置中的 1/f 噪声的影响。2009 年, PENG Y 等人^[5]基于共振式光声池研发了一种 C₂H₂ 气体检测系统, 在常温常压下的极限检测灵敏度达到了 0.3 ppm; 在此之后, 该课题组^[6]对多组分气体光声光谱的独立成分分析方法进行了研究, 结合波分复用技术连续测量了 H₂O、C₂H₂、CO、CO₂ 的混合痕量气体。2011 年, 陈伟根课题组^[7]对一阶纵向共振光

收稿日期: 2023-02-11。

基金项目: 陕西省科学技术项目(No.2019GY-176)资助。

作者简介: 闫星宇(1996—), 男, 山西临汾人, 本科毕业于兰州交通大学自动化专业, 现为西安石油大学理学院硕士研究生, 主要研究方向为光声光谱气体传感技术、光纤声波传感器、光纤传感等, 参加了陕西省科研项目。

* **通信作者:** 傅海威(1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为光电子学及光纤传感技术。



声池的特性参数进行了理论分析,发现谐振腔长为 120 mm、半径为 3 mm 的不锈钢光声池表现出比较优越的气体响应性能,并对变压器油中溶解的 C_2H_2 进行了光声探测。2019 年,程刚课题组^[8]对光声池的形状进行了优化,将谐振腔的两端设计为喇叭状,减小了光束打在腔壁的噪声影响,优化后的新型光声池品质因素较之前增长了 48.9%,池常数增长了 34.4%。2021 年,赵南等人^[9]利用有限元仿真软件研究光声池几何参数的变化对其性能的影响,并设计出一种谐振腔与缓冲室为圆角连接的光声池,其品质因数提高了 1.109 倍,对 CH_4 气体的极限检测灵敏度达到 0.87 ppm。综上所述,当前围绕光声池的研究主要集中在气体检测系统的应用上,而有关光声池特征频率的设计和 optimization 研究较少。因此,本文采用有限元法,以共振式光声池为例,通过控制变量研究光声池谐振腔、缓冲室的长度和半径对其特征频率、光声信号强度的影响,为设计特定频率的光声池提供思路。

1 光声池基本原理

光声光谱技术原理^[10]如下:在密闭的光声池内,气体分子吸收经过调制的特定波长的光能,从基态被激发到高能态,高能态分子之间相互碰撞又使部分受激分子通过无辐射弛豫返回基态,吸收的光能转变为热能,最终腔内的气体受热膨胀而产生声波^[11];该声波的幅度与气体浓度成正比,其频率与入射光的频率保持一致,当声波在音频范围内变化时,可以使用灵敏的麦克风、悬臂梁、石英音叉等声波检测器对其进行检测。因此,可以通过检测光声信号的谱线和强度,推导反演出当前环境下的气体种类及浓度,达到探测气体浓度的目的。

本文以一阶纵向圆柱形光声池为基础,假设待测气体吸收调制光后能形成热功率密度源 $H(r,t)$,其中, r 表示空间的位置坐标向量, t 表示时间。由气体定律可知,该热功率密度源 $H(r,t)$ 将在腔内激发出声波。若腔内的气体近似为理想气体,当光声池工作在简正模式下,即共振频率 $\omega=\omega_j$ 时,光声池中 r 处的声压为

$$p(r, \omega_j) = -(\gamma - 1) \frac{Q_j}{\omega_j} \frac{1}{V} I_0 p_0 \alpha c \quad (1)$$

其中, ω_j 为简正模式 j 的谐振角频率, I_0 为入射光强度, V 为光声池的体积, Q_j 为光声池的品质因数, α 为气体吸收系数, l 为光声池的长度, P_0 为激光入射光功率, c 为目标气体浓度。 $-(\gamma - 1) \frac{Q_j}{\omega_j} \frac{1}{V} I_0 p_0 \alpha c$ 称为光声池

常数,记做 c_u 。因此,光声信号可以表示为

$$S_s = \alpha c_u P_0 c \quad (2)$$

2 仿真结果及讨论

2.1 物理模型及基本参量

光声池是光声光谱气体检测装置中最核心的部分,它决定着整个光声光谱检测系统性能的优劣。光声池中的谐振腔、缓冲室的半径和长度直接影响光声信号的大小。为了分析光声池各个参数对其性能的影响,找出光声信号最强、便于探测光声信号的位置。本文采用的光声池结构如图 1 所示,主要由谐振腔、缓冲室、入射窗口、出射窗口、进气口、出气口等组成。使用热粘性声学模块对光声池空腔结构进行声学模态频率和相应的振型分析,可以表征出其内部压力分布特性。

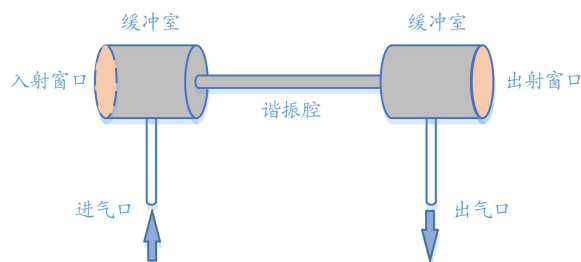


图 1 光声池结构示意图

当声波以某一模态频率在空腔内传播时,光声池会随之发生声学共振,放大内部的光声信号。为求解光声池空腔模态,本文采用多物理场仿真程序的有限元离散化方法对其进行数值求解。定义光声池内的气体为 N_2 ,密度为 1.25 g/L,声速为 349 m/s,热功率密度源 $H(r,t)$ 为 0.1 W/kg。光声池初始参数设置如下:谐振腔半径为 3 mm,长度为 120 mm;缓冲室半径为 10 mm,长度为 60 mm。采用平台上的物理场智能控制网格对其进行网格剖分,得到光声池前 8 阶声学模态仿真结果如图 2 所示。可以看出,在光声池的前 8 阶声学模态振型中,前 6 阶为纵向模态阵型,第七阶为角向模态振型,第八阶为纵向和角向混合振型。可以预见,随着模态阶数的增加,光声池的模态振型会越来越复杂^[8]。图中颜色从蓝到红表示声压的升高,红色区域的声压较大,表示声场能量相对集中。结合光声池的模态分析可知,在设计光声池时,声传感器的位置应靠近声压相对较强的位置,进气口、出气口应尽量选择在声压较弱的位置。其中,第二阶特征频率的谐振腔的中部区域声压最大且声场能量相对集中,在缓冲室区域声压最小,这与文献[14]的表征结果一致。将

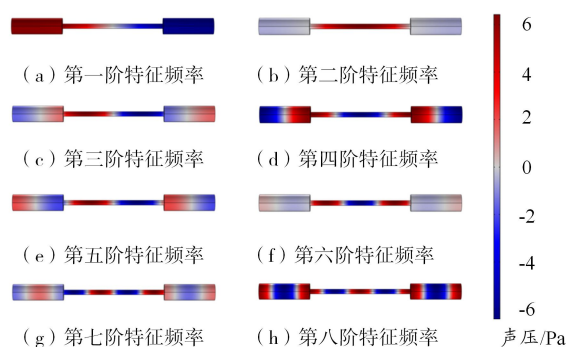


图2 光声池前8阶声学模态仿真图

光声池的工作模态选在此阶有利于光声信号的探测和传感器的安装,因此本文的工作围绕光声池的第二阶特征频率展开。

2.2 谐振腔、缓冲室半径对光声信号强度及特征频率的影响

光声池的主要参数有谐振腔长度 L 、谐振腔半径 R_k 、缓冲室半径 R_b 。本文采用变量控制法来分析以上参数对光声池特征频率的影响。采用有限元仿真软件建立如图3所示的光声池内腔模型,该模型为二维轴对称结构。

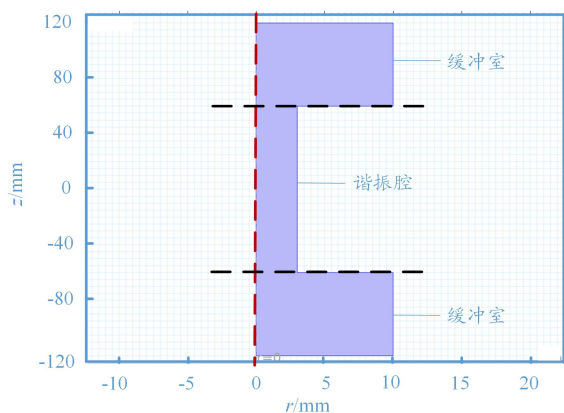


图3 光声池二维轴对称结构图

在光声池内部设置热源声源,模拟激光对气体分子的激发;采用频率扫描研究,仿真分析光声池的频率响应。谐振腔轴向上的光声信号分布如图4所示。可以看出,谐振腔光声信号最强的地方在其中部,因此可以将管壁中心点作为光声信号最大值的研究点。

根据文献[15]可知,光声池缓冲室长度为谐振腔长度 L 的一半时能有效降低噪声,因此在设置参数时可将缓冲室长度设为 $L/2$ 。

为研究光声池谐振腔半径 R_k 与缓冲室半径 R_b 之比对光声信号强度的影响,令 $R_b = aR_k$,其中 a 的变化范围为 $1.1 \sim 5$, $R_k = 2 \sim 7$ mm, 谐振腔长度 $L = 120$ mm、缓

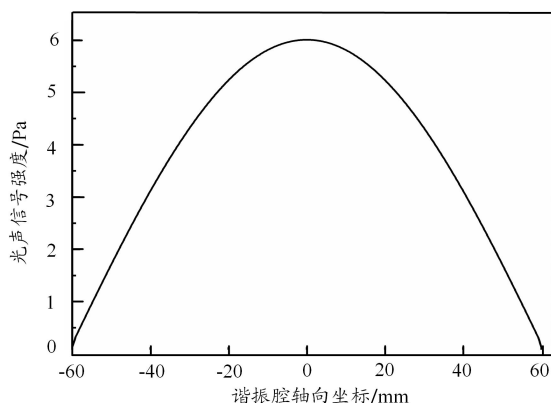


图4 谐振腔轴向上的光声信号分布

冲室长度为 60 mm($L/2$)保持不变。通过仿真计算发现在上述参数情况下,光声池的第二阶特征频率为 $1\ 200 \sim 1\ 500$ Hz。因此,本文以步长为 2 Hz 对光声池在特征频率 $1\ 000 \sim 1\ 600$ Hz 内进行参数扫描,扫描结果如图5所示。通过对比光声信号的强度可以看出,随着 a 的增大,光声信号峰值呈递增趋势;并且随着 R_k 的增大,光声信号峰值整体呈下降趋势。尽管当 $R_k = 2$ mm 时的光声信号整体峰值最大,但由于 $R_k = 2$ mm 时容易使激光打在腔壁上产生噪声,因此本文优先考虑 $R_k = 3$ mm 的谐振腔。

2.3 谐振腔长度对光声信号强度及特征频率的影响

固定 $R_k = 3$ mm、 $R_b = 3.5R_k$, L 设置为 $110 \sim 160$ mm, 以步长 10 mm 进行参数扫描,扫描结果如图6所示。可以看出,随着谐振腔长度的增加,光声信号强度呈递增趋势。为判断图6中各峰值点是否工作在光声池的第二阶特征频率上,固定 $R_k = 3$ mm、 $R_b = 3.5R_k$,求取不同谐振腔长度 L 下光声池的第二阶特征频率,结果如图7所示。可以看出,当 L 在 $110 \sim 160$ mm 变化时,随着谐振腔长度的增大,光声池的第二阶特征频率在逐渐减小,且与图6中各峰值点一一对应。

2.4 特征频率为 $1\ 400$ Hz 的光声池最优尺寸设计

固定 $R_k = 3$ mm,令 $a = 1.1 \sim 5$ (步长为 0.1), $L = 110 \sim 160$ mm (步长为 5 mm),求取各尺寸下的第二阶特征频率,得到的 L 范围为 $115 \sim 125$ mm。细化 L 的步长为 1 mm,得出特征频率在 $1\ 395 \sim 1\ 405$ Hz 时的光声池尺寸参数。由图5可知,在谐振腔半径、长度一定时,缓冲室半径越大光声信号越强,因此可以从中筛选出4组参数如表1所示。

在特征频率为 $1\ 150 \sim 1\ 600$ Hz 时对表1中4组尺寸的光声池进行扫描,得到如图8所示的光声信号响应强度图。

图8中,4根曲线分别对应4组参数下光声池的

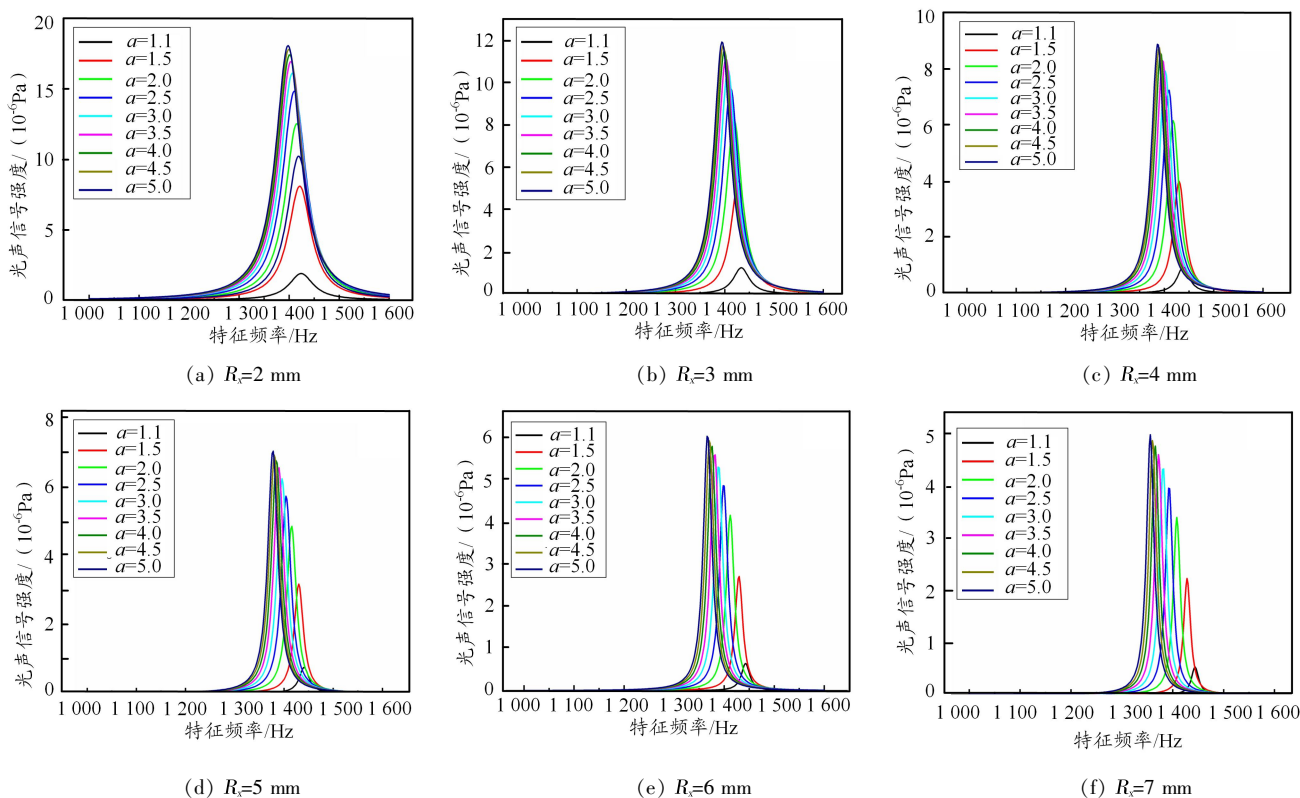


图5 谐振腔半径 R_s 为 2~7 mm、不同 a 值时光声信号在特征频率为 1 000~1 600 Hz 的分布

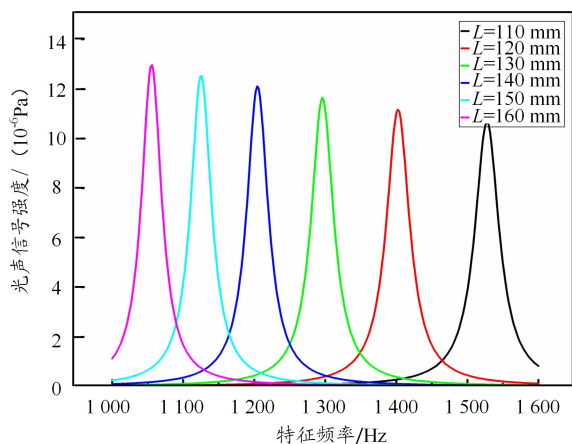


图6 不同谐振腔长度 L 下光声信号的分布

表1 特征频率为 1 400 Hz(± 5 Hz)的光声池参数

a 的取值	谐振腔长度/mm	特征频率/Hz
1.3	123	1396.3
2.0	122	1395.8
3.0	121	1395.1
4.9	120	1395.1

光声信号强度,其峰值都在 1 400 Hz 附近取得,与表 1 中的特征频率相对应。根据共振频率曲线可计算光声池的品质因数 Q 值,即有 $Q=\omega/\Delta\omega$ ($\Delta\omega$ 是 $1/\sqrt{2}$ 峰

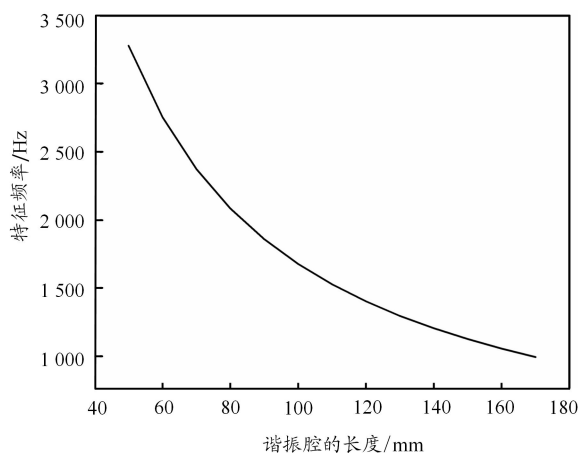


图7 不同谐振腔长度 L 下光声池的第二阶特征频率

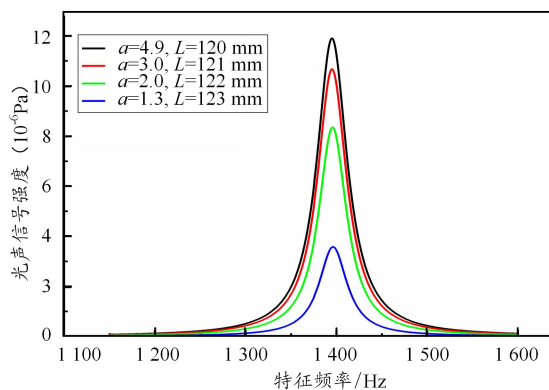


图8 4组参数下光声信号响应强度图

闫星宇,傅海威,雍振,等:光声光谱气体检测系统中光声池的仿真优化设计

值的全宽度),计算得到图8中各曲线从上到下的 Q 值分别为53.65、53.80、55.83、55.85。4组参数下光声池的品质因数相差较小,但黑色曲线光声信号强度最大,表明该参数下光声池的性能最优,对应的光声池参数如下:谐振腔半径为3 mm、长度为120 mm,缓冲室的半径为14.7 mm、长度为60 mm。

3 结束语

本文通过对光声池的声学模态分析,发现在光声池的第二阶特征频率下其内部声场强度分布更集中;在有限元仿真平台利用控制变量法研究光声池参数对其特征频率和光声信号强度的影响。研究结果表明:在其它条件不变的情况下,谐振腔长度和缓冲室半径的增大都能增强光声信号的强度,而谐振腔半径的增大会减弱光声信号强度;缓冲室半径和谐振腔长度的增大都会降低光声池的谐振频率。最后,本文得出了特征频率在1 400 Hz附近的光声池最佳尺寸。

参考文献:

- [1] WEBBER M E, MACDONALD T, PUSHKARSKY M B, et al. Agricultural ammonia sensor using diode lasers and photoacoustic spectroscopy[J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(8): 1547–1553.
- [2] HUSSAIN A, PETERSEN W, STALEY J, et al. Quantitative blood oxygen saturation imaging using combined photoacoustics and acousto-optics[J]. Optics letters, 2016, 41(8): 1720–1723.
- [3] LIU Q, NIU M S, WANG G S, et al. Development of a photoacoustic spectroscopy system for the measurement of absorption coefficient of atmospheric aerosols[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(7): 1729–1733.
- [4] 邵晓鹏,张乐,刘丽娟,等.基于光声光谱技术的多组分气体探测研究进展[J].数据采集与处理,2021,36(5):850–871.
- [5] PENG Y, YU Q X. Tunable fiber laser based photoacoustic spectroscopy for acetylene detection [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(8): 2030–2033.
- [6] WANG J, ZHANG W, LIANG L, et al. Tunable fiber laser based photoacoustic spectrometer for multi-gas analysis [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2011, 160(1): 1268–1272.
- [7] CHEN W G, LIU B J, HUANG H X. Photoacoustic sensor signal transmission line model for gas detection in transformer oil [J]. Sensor Letters, 2011, 9(4): 1511–1514.
- [8] 程刚,曹渊,刘锟,等.光声光谱检测装置中光声池的数值计算及优化[J].物理学报,2019,68(7):139–149.
- [9] 赵南,刘阳,赵宁阳,等.光声光谱检测系统中光声池模型的建立与优化[J].光子学报,2021,50(7):246–256.
- [10] HANSON R K, SPEARRIN R M, GOLDENSTEIN C S. Spectroscopy and optical diagnostics for gases[M]. New York: Springer International Publishing Switzerland, 2016.
- [11] 杨志远,卢荣军,王生春.一种纵向共振光声池谐振频率测量方法[J].激光技术,2019,43(3):387–391.
- [12] 殷庆瑞,王通,钱梦碌,等.光声光热技术及其应用[M].北京:科学出版社,1991.
- [13] LI J, GAO X, LI W, et al. Near-infrared diode laser wavelength modulation-based photoacoustic spectrometer [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2006, 64(2): 338–342.
- [14] HUANG Q, ZHOU S, HE T, et al. Modeling of a cylindrical resonant photoacoustic cell for high sensitive gas detection[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2021, 63(10): 2528–2534.
- [15] 李劲松,刘锟,张为俊,等.近红外波段 CO_2 分子弛豫动力学效应对光声信号的影响[J].光谱学与光谱分析,2008,28(9):1953–1957.