

文章编号: 1005-5630(2015)05-0377-04

基于光线追踪法的高精度 CO₂ 测量系统的研究

伍 雷, 张 学 典, 王 业 生, 于 西 龙, 李 荆 轩, 颜 泽 帆

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了提高测量精度, 对光线的有效利用率和最佳光程的选择进行了推导和优化。首先应用光线追踪法模拟 CO₂ 气室光路结构, 计算光线的有效利用率; 其次通过分析红外探测器接收到的光线, 计算光程长对测量结果贡献率的影响, 得出 4.26 μm 波长下 CO₂ 的最佳光程为 31 mm。据此设计了 CO₂ 体积分数测量系统, 并对 20×10⁻⁶~1 500×10⁻⁶ 范围内的标准气体进行了测量。实验结果表明, 该系统的测量精度可达到 50×10⁻⁶。

关键词: 光学测量; CO₂ 体积分数测量; 光线追踪法; 最佳光程长

中图分类号: O 439 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.05.001

A CO₂ measurement system with high accuracy based on ray tracing approach

WU Lei, ZHANG Xuedian, WANG Yesheng, YU Xilong, LI Jingxuan, YAN Zefan

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In this paper, a development of a non-dispersive infrared (NDIR) CO₂ gas measurement system with an optical path length of 31 mm is described. The system improves its accuracy by optimizing the optical path and the light efficiency. Firstly, the ray tracing approach is used to simulate the light path of the chamber, so the light efficiency can be calculated. Secondly, based on the simulation result of the sensor that every different optical path length has its own contribution to the measurement, the optimized optical path length for CO₂ measurement in the wavelength of 4.26 μm is 31 mm. Then the CO₂ volume fraction measurement system is designed and tested by measuring the standard gas whose concentration is in the range of 20×10⁻⁶~1 500×10⁻⁶, and the experimental results show that the measurement accuracy of the system can reach 50×10⁻⁶.

Keywords: optical measurement; measurement of CO₂; ray tracing approach; best optical path length

引 言

二氧化碳气体作为环境中普遍存在的一种气体,影响着各种动植物的生存状态与活动。二氧化碳的

收稿日期: 2015-02-02

基金项目: 国家科技专项(2014ZX07104); 国家重大仪器专项(2013YQ03065104); 国家科技支撑项目(2012BAI23B00)

作者简介: 伍 雷(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光谱测量方面的研究。E-mail: 469519316@qq.com

通信作者: 张 学 典(1974—), 男, 副教授, 主要从事在线仪器检测和图像处理方面的研究。E-mail: zhangxuedian@hotmail.com

体积分数在环境卫生、卫生防疫、工业过程控制与分析、医学诊断以及宇航生保等领域是需要实时监测与分析的重要参数^[1]。自然界中的植物在进行光合作用时会吸收二氧化碳气体,所以环境中的二氧化碳的体积分数可以反映植物的生长状况,从而起到对植物生长的预警和检测作用。特别在现今温室效应日趋严重的情况下,对二氧化碳的测量具有更重要的意义。

目前利用光谱分析测量二氧化碳体积分数有多种方式,其中应用较普遍的是红外非色散分析法(NDIR)。特别是在现今传感器件小型化、集成化和智能化的背景下,红外气体分析仪器以其体积小、重量轻、精度高、可靠性好、可连续快速检测等特点,在二氧化碳的体积分数测量中应用广泛。张广军等^[2]设计的小型红外 CO₂ 传感器,通过采用旋转抛物面接收光锥有效地提高了信噪比,可实现较高的测量精度。Hök 等^[3]设计的检测呼气中酒精含量的手持气体分析仪,通过对 CO₂ 的测量来检测呼气中酒精的体积分数,主要运用 NDIR 原理,在光路设计中运用多个反射面来提高光程长度从而提高测量精度。王莉等^[4]应用集成的 CO₂ 体积分数传感器获得信号,通过设计和改进传感器的滤波放大和信号处理电路系统来减小环境对测量的干扰,并在数据处理中优化数据处理算法,以此提高系统的测量精度。

本文主要设计了一种 CO₂ 测量系统,采用了光线追踪法计算光线的有效利用率,在此基础上计算最佳光程长,以达到提高传感器的测量精度的目的。

1 理论分析

大部分气体分子在红外波长范围内都有特征吸收峰,CO₂ 的特征吸收峰位于 4.26 μm 处^[5]。当一束波长为 λ、光强为 I₀ 的单色光平行入射装有待测气体 CO₂ 的气室时,由于 CO₂ 在 4.26 μm 处有吸收峰,因此从气室出来的光的输出光强 I 会减小,而这个吸收关系服从 Lambert-Beer 吸收定律,输出光强度 I、输入光强度 I₀ 和气体体积分数 C 之间的关系为

$$I = I_0 \exp(-KCL) \quad (1)$$

式中:K 为 CO₂ 气体的吸收系数;L 为光和气体的作用长度(传感长度),在传感器中表现为气室中光程的长度。

2 最佳光程分析

测量光程^[6]是系统测量性能的一个重要因素。汪曦等^[7]对光程长度与灵敏度之间关系的研究表明:单位光程长吸光度越小,则光程长对测量误差的影响越小,可选择光程长范围就越宽。对于单个样品,当最佳光程长获取存在较大误差时,应使所选光程长落在大于最佳光程长的区域。由式(1)可知,在条件不变的情况下,测量光程越精确,测量所得到的体积分数精度越高。而在实际测量光路中,光程长的值不是确定的,而是分布在一定范围内。所以可以通过仿真模拟的方法来计算得到一个和真实光程长接近的最佳光程长来减小光程带来的误差,最佳光程长可由模拟所得的光线利用率^[8]和有效光程的分布计算得出。光线利用率指被红外探测器所接收的光线占有出射光线的比例;有效光程分布是指在理想状态下不同光程出现的概率和该光程在所有光程中所占的比例。通过模拟计算不同光程长下的光线利用率,得出最佳光程长。

由于测量光程会受到气室环境,如内壁气室的材料、气室的形状、光源的类型以及气室内部的介质等的影响,因此在仿真时充分考虑了这些因素。模拟的具体条件为:光源为点光源,发散角 45°;气室内壁材料为铝,形状为圆筒状,长度为 30 mm,直径为 10 mm;气室内介质为真空;红外探测器的接收面积为圆形,直径为 6 mm。应用光线追踪法(ray tracing approach)^[9],可从光源开始追踪每条光线经过气室内壁被反射的过程,直到最终被红外探测器接收。

图 1 为 Zemax 仿真模拟的气室内光路和探测器接收到的光线分布图,由图可知:一部分光线出射后经过气室内壁反射一次或多次后最终才能被气室后的红外探测器接收;另一部分光线不经过气室内壁的反射而直接到达探测器。光经过反射后,其光强会有一定程度的衰减,故光线利用率主要由探测器接收面的面积和气室内壁的材料决定。

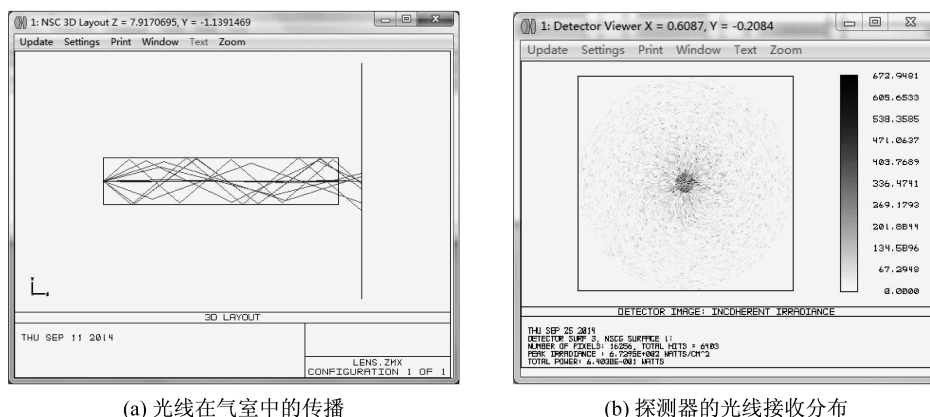


图 1 Zemax 模拟气室中光线的传播和接收

Fig. 1 Light transmission and receiving in Zemax

根据光线追踪法计算得到各反射光线对应的光程长度分布如图 2 所示。根据模拟的实际光程所占百分比的分布图可知:在 30 mm 光程附近的光线由于没有经过反射,很容易就被探测器所接收;而在 30 mm 到 35 mm 之间得到各波谷则是由于光线经过多次反射而衰减无法被探测器探测到;随着光程的增加光强度减弱,能被探测器接收的概率越低。综上所述,由光线利用率和光程分布计算得出 CO₂ 测量的最佳光程为 31 mm。

3 实验结果与数据分析

为了验证上述仿真结果,本文设计了 CO₂ 测量系统。测量系统主要由光源、气室和红外探测部分组成,如图 3 所示。系统的工作流程为:单片机 STC8051 实现光源的控制,光源出射的光进入气室后经样品吸收到达另一侧的红外探测部分并被接收。通过对比入射光和测量光的光强,得出被测 CO₂ 的体积分数大小。系统光源采用中心波长在 4.3 μm 附近的 LED 光源,气室长度为 31 mm,并减小气室接收端的直径,以确保测量光程的峰值在 31 mm 附近。

实验时,将测量系统放置于密封容器内,如图 4 所示。将固定体积分数的 CO₂、N₂ 混合气体通入到此容器中。实验共对 8 个不同 CO₂ 体积分数的标准气体进行了测量,具体为 20 × 10⁻⁶, 50 × 10⁻⁶, 100 × 10⁻⁶, 150 × 10⁻⁶, 200 × 10⁻⁶, 500 × 10⁻⁶, 1 000 × 10⁻⁶ 和 1 500 × 10⁻⁶。为提高系统的测量精度,在测量过程中采取 5 次测量取平均值的方法。

实验得到的数据如表 1 所示,将测量得到的 CO₂ 体积分数与标准值进行比对,得到的关系曲线如图 5 所示。

实验结果表明:测量系统得到的数据能准确反映密闭气室内部的 CO₂ 的体积分数的变化,而且每个监测点的体积分数的标准偏差离散值在 3 左右;测量所得的数据拟合得到的曲线也能准确反映真实体积分数变化,且拟合曲线的相关系数 *R* 很接近于 1;每次测量值与相同环境多次测量的平均值相比,其测量数值误差均在 50 × 10⁻⁶ 以内,表明测量系统的性能稳定。

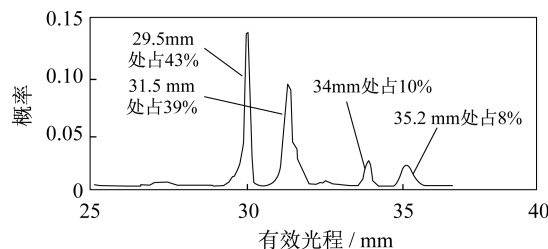


图 2 模拟所得有效光程分布图

Fig. 2 Effective optical path distribution in the simulation

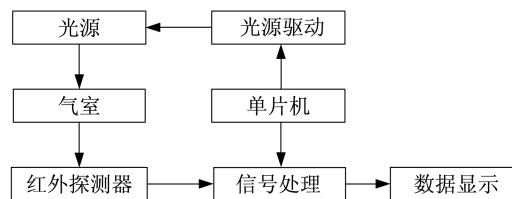


图 3 CO₂ 体积分数测量系统结构示意图

Fig. 3 System structure of the system

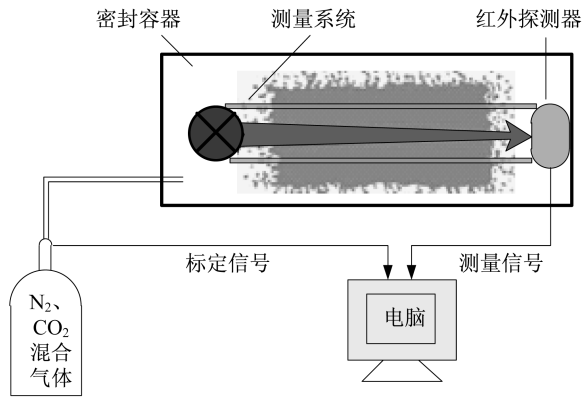


图 4 CO₂ 测量系统示意图

Fig. 4 Measurement system of the experiment

4 结 论

由测试实验可知,本测量系统能很好地完成 CO₂ 体积分数测量的任务。系统具有高精度、高灵敏度的特点。应用 Zemax 进行有效测量光程的预估与计算,优化了测量精度,提高了系统的测量性能。系统稳定性良好,在多次测量的比较试验中,单次测量误差值很小。

参考文献:

[1] 张广军,吕俊芳,周秀银,等. 二氧化碳浓度红外测量方法综述[J]. 实用测试与技术,1995(1):8-11.
 [2] 张广军,李亚萍,李庆波. 小型红外 CO₂ 气体分析仪[J]. 仪器仪表学报,2009,30(5):1032-1036.
 [3] HÖK B,PETTERSSON H,ANDERSSON A,et al. Breath analyzer for alcohollocks and screening devices[J]. IEEE Sensors Journal, 2010,10(1):10-15.
 [4] 王莉,陈小平. 基于红外传感器的 CO₂ 测量装置[J]. 传感器与微系统,2011,30(11):115-117.
 [5] 李亚萍,张广军,李庆波. 空间双光路红外 CO₂ 气体传感器及其测量模型[J]. 光学 精密工程,2009,17(1):14-19.
 [6] 耿东峰,何英杰,苏宏毅. 透明台阶的白光干涉测量方法研究[J]. 光学仪器,2013,35(6):74-77.
 [7] 汪曦,卢延辉,王蕊,等. 光程长对光谱测量误差的影响[J]. 天津大学学报,2004,37(10):906-909.
 [8] HODGKINSON J,SMITH R,HO W O,et al. Non-dispersive infra-red (NDIR) measurement of carbon dioxide at 4.2 μm in a compact and optically efficient sensor[J]. Sensors and Actuators B:Chemical,2013,186:580-588.
 [9] MAYRWÖGER J,HAUER P,REICHL W,et al. Modeling of infrared gas sensors using a ray tracing approach [J]. IEEE Sensors Journal,2010,10(11):1691-1698.

(编辑:刘铁英)

表 1 不同体积分数 CO₂ 测量值

真实值	测量值					平均值
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	
20	10	11	12	11	10	11
50	29	32	33	32	28	31
100	85	83	79	84	82	83
150	120	121	117	122	120	120
200	186	178	177	177	174	188
500	479	478	485	481	488	482
1 000	988	980	987	993	986	987
1 500	1 490	1 489	1 485	1 480	1 478	1 484

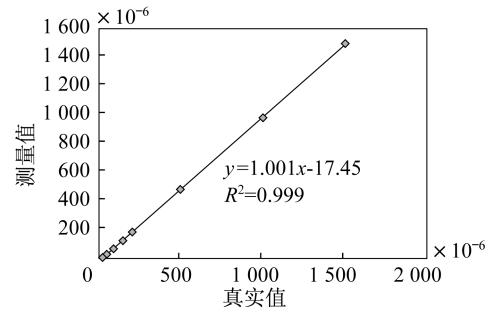


图 5 体积分数测量值与标准值的比较曲线

Fig. 5 Fitted curve of measured results