

新型光室结构的主流式 NDIR 呼吸 CO₂ 监测系统

熊涛¹, 高明¹, Des Gibson², David Hutson²

(1. 西安工业大学光电工程学院, 陕西西安 710021;
2. 西苏格兰大学薄膜、传感器、成像学院, 英国佩斯利 PA12BE)

摘要: 针对主流式非分散红外 (NDIR) 呼吸 CO₂ 监测系统灵敏度及信噪比低下的问题, 提出利用复合抛物面聚光器 (CPC) 提升监测系统性能的方法。利用 ZEMAX 模拟光室并优化 CPC 和常用的圆管聚光器以及锥形聚光器, 采用单光源双光路的主流式一体化方法进行监测系统的气室设计, 以 STM32F100 为主控芯片实现硬件系统控制, 对具有不同光室结构的监测系统进行 CO₂ 浓度标定和实时人体呼吸检测实验, 获取其 CO₂ 浓度与系统输出信号的对应关系和 CO₂ 波形图。结果表明, CPC 光室其模拟光学效率为 4.3%, 比常用的聚光器最高可提升 89.77 倍; 装有 CPC 的监测系统其灵敏度与信噪比为 8.940 7、24.65, 比装有常用聚光器的系统的灵敏度最高可提升 3.811 倍、信噪比提升 1.926 倍; 并且安装 CPC 的系统运行稳定, 响应快, 能够实时的反应出被测者的呼吸 CO₂ 波形图。

关键词: 呼吸 CO₂ 监测; 复合抛物面聚光器; 非分散红外; 光室

中图分类号: O657.3 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20190575

Mainstream NDIR breathing CO₂ monitoring system based on new light chamber structure

Xiong Tao¹, Gao Ming¹, Des Gibson², David Hutson²

(1. Institute of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;
2. Institute of Thin Films, Sensors and Imaging, University of the West of Scotland, Paisley, PA12BE, United Kingdom)

Abstract: Aiming at the problem of low sensitivity and low signal-to-noise ratio of mainstream non-dispersive infrared (NDIR) breathing CO₂ monitoring systems, the method using a compound parabolic concentrator (CPC) to improve the performance of the monitoring system was proposed. ZEMAX was utilized to simulate optical chambers, optimize CPC and commonly used straight cylinder concentrator and cone concentrator. The mainstream integrated method of single source and double light path was used to design the chamber of the monitoring system. STM32F100 was selected as the main control chip to control the hardware system. CO₂ concentration calibration and real-time human breathing detection experiments were performed on monitoring systems with different optical chamber structures, and the corresponding relationship between CO₂ concentration and system output signals and CO₂ waveform diagrams were obtained. The results show that the CPC optical chamber has a simulated optical efficiency of 4.3%, which can be up to 89.77 times higher than commonly used concentrators; the monitoring system equipped with CPC has a sensitivity and signal-to-noise ratio of 8.940 7 and 24.65, which can increase the sensitivity by up to 3.811 times and the signal-to-noise ratio by 1.926 times

收稿日期: 2020-03-05; 修订日期: 2020-04-20

基金项目: 陆军装备预研项目; 陕西省重点实验室项目 (17JS052)

作者简介: 熊涛 (1995-), 男, 硕士生, 主要从事光学设计理论及技术方面的研究。Email: 421505973@qq.com

导师简介: 高明 (1964-), 男, 教授, 主要从事光学设计、光电测试技术方面的研究。Email: minggao1964@163.com

compared to systems equipped with common concentrators; And the system installed with CPC runs stably, responds quickly, and can display the capnogram of the subject in real time.

Key words: respiratory CO₂ monitoring; non-dispersive infrared; compound parabolic concentrator; optical chamber

0 引言

目前,国内外针对 CO₂ 气体有多种检测方法,其在遥感探测、农业、医学、工业等领域有着广泛的应用^[1-2],常用的呼吸 CO₂ 浓度监测系统主要是根据 NDIR 原理设计的^[3],如 Cinar 等人^[4]在 2012 年利用 EMMA 主流式急诊 CO₂ 计对 162 位病人进行临床实验,通过测定病人潮气末 CO₂ 值 (ETCO₂) 来预测病人的肺泡 CO₂ 浓度,从而判定病人是否呼吸困难。Singh 等人^[5]在 2007 年至 2011 年间利用 Nellcor 微型旁流式 CO₂ 监测仪通过监测 34 名 ICU 低出生体重 (VLBW) 新生儿和 48 名非 ICU 新生儿的 ETCO₂ 来预测血液 CO₂ 浓度 (PCO₂)。根据监测模块的测量位置,监测系统大致有两种实现方法:旁流式、主流式呼吸监测法。近年来,通过改变光学结构来提高性能的方法被广泛地用于旁流式 CO₂ 监测系统, Johann 等人^[6]在 2011 年为了提升旁流式 NDIR CO₂ 监测系统的性能,利用 TracePro 设计模拟了螺旋管聚光器 (spiral) 与椭圆管聚光器 (ellipsoid),其模拟结果表明,装有 spiral 的系统其灵敏度比之 ellipsoid 系统提升了 10%; Han 等人^[7]在 2013 年的报道中,对旁流式 CO₂ 监测系统中台阶锥形聚光器 (stair-tapered) 和锥形聚光器 (cone) 进行了模拟和实验验证,该团队发现 stair-tapered 系统的输出电压灵敏度的模拟及实验结果分别是 cone 系统的 2 倍和 1.27 倍;张等人^[8]在 2004 年提出的旁流式 CO₂ 分析仪中,采用圆管聚光器进行光室设计,其样机在 0~3% 测量范围内的精度可达 ±0.028%。Ashraf 等人^[9]在 2018 年的研究中,通过在旁流式 CO₂ 监测仪光室内安装特制反射镜,来增加光线在气体中的光程从而提升系统探测下限值,实验表明,最终该监测仪可实现几个 ppm 至 1 300 ppm 的 CO₂ 浓度测量。然而,由于旁流式与主流式监测系统光室结构的不同,因此其光室设计思路存在一定差异,但是,鲜有关于通过优化光室结构的方法提升主流式 CO₂ 监测系统性能的报道。

为了实现高信噪比、高灵敏度并且实时监测

CO₂ 浓度的目的,文中设计了一款结合 CPC 的 NDIR 主流式 CO₂ 监测系统。CPC 的参数借助 ZEMAX 软件进行了优化,基于优化结果加工出模型之后,进行了 CPC 聚光效果验证实验。搭建了主流式 CO₂ 监测系统,对该系统先后安装三种不同结构的光室以对比它们对监测系统灵敏度以及信噪比的提升程度,并且对性能最佳的系统进行了实时人体呼吸 CO₂ 监测实验。

1 基本原理

呼吸 CO₂ 监测主要基于 Beer-Lambert 定律^[7]:

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

式中: I_0 是入射光强度; I 是接收到的光强度; c 是呼吸管中的 CO₂ 浓度; l 是光线在 CO₂ 气体中走过的光程; k 是 CO₂ 对波长为 4.26 μm 的光线的吸收系数,其值为 10⁻¹⁸ cm⁻¹/(molecule × cm⁻²),它比 CO₂ 在近红外波段的吸收系数大四五个数量级。Beer-Lambert 定律描述了一种通过样品对特征吸收带的强度的吸收来测量组分浓度的方法。

在目标频带中,特征吸收频率对应于检测物质。红外光通过样品室被气体吸收一定比例的光能量,并且此比例与样品气体浓度有关,符合 Beer-Lambert 定律。

从公式 (1) 中可以推知,相同气体浓度下, I_0 越大,探测器输出电压的幅值越高。因此,从理论上而言,通过提升光学模块的光能传输效率来提升监测系统的性能是可行的。

CPC 是一类具有抛物线型纵剖面的反射型聚光器 (见图 1),其在太阳能收集领域有着极为广泛的应用^[10],其特征在于呈阶梯状的传输效率曲线,可以有效地收集从 0° 到最大角度 (称为接收角) 的光^[11]。

CPC 是由如下参数定义的: 出光孔径半径 a' ; 长度 L ; 接收角 θ_{acc} ; 抛物线焦点 f 。这五个参数可完全定义一个三维 CPC,它们之间有如下基本关系:

$$f = a' (1 + \sin \theta_{acc}) \quad (2)$$

$$a' = a \cdot \sin \theta_{acc} \quad (3)$$

$$L = (a + a') \cdot \text{ctg} \theta_{acc} \quad (4)$$

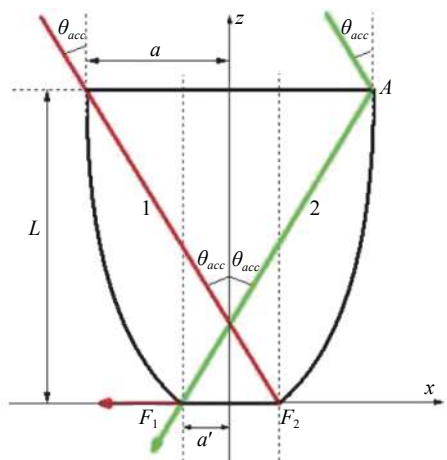


图 1 CPC 纵剖面^[12]

Fig.1 CPC longitudinal cross section^[12]

图 1 中右半部分抛物线坐标解析式 $z = z(x)$ 为:

$$z = d \cdot w(x) - e \cdot \sqrt{w(x)} + g \quad (5)$$

其中 d, e 和 g 为常数:

$$d = \frac{\cos \theta_{acc}}{16f \cdot \sin^2 \theta_{acc}} \quad (6)$$

$$e = \frac{1}{2} + \frac{2b \cdot \cos \theta_{acc}}{16f \cdot \sin^2 \theta_{acc}} + \frac{a' \cdot \cos \theta_{acc}}{4f \cdot \sin \theta_{acc}} \quad (7)$$

$$g = \frac{b}{2} + \frac{b^2 \cdot \cos \theta_{acc}}{16f \cdot \sin^2 \theta_{acc}} + \frac{a'^2 \cdot \cos \theta_{acc}}{4f} + \dots + \frac{a' b \cdot \cos \theta_{acc}}{4f \cdot \sin \theta_{acc}} + a' \cdot \sin \theta_{acc} - f \cdot \cos \theta_{acc} \quad (8)$$

其中 b 和 c 是常数:

$$b = 4f \cdot \cos \theta_{acc} - 2a' \cdot \sin \theta_{acc} \quad (9)$$

$$c = (a')^2 \cdot \sin \theta_{acc} - 4f^2 \cdot \sin \theta_{acc} + \dots + 4fa' \cdot (1 - \cos \theta_{acc}) \quad (10)$$

公式 $w(x)$ 定义如下:

$$w(x) = b^2 - 4 \cdot (4f \cdot x + c) \cdot \sin \theta_{acc} \quad (11)$$

2 监测系统的搭建

搭建主流式呼吸 CO_2 监测系统, 利用 ZEMAX 模拟优化 CPC、常用的圆管聚光器 (Straight cylinder) 与圆锥聚光器 (Cone) 并加工出实物。分别结合这三款聚光器构造监测系统的光学部分, 以 STM32F100 为主控芯片实现硬件系统控制, 利用该芯片进行信号的调制解调以及数据映射等信号处理。通过一系列 CO_2 浓度标定以及实时人体呼吸监测实验获得安装

不同聚光器时的监测系统其灵敏度、信噪比以及实时 CO_2 波形图。

2.1 CPC 的模拟及制备

由于人体呼吸气体中 CO_2 的浓度基本处于 400~50 000 ppm 之间, 根据 Beer-Lambert 定律选择呼吸管道直径为 20 mm^[13], 并通过 ZEMAX 软件建立光源及探测器模型, 将 CPC 的最佳聚焦距离优化至 20 mm, 该光路系统主要输入参数见表 1, 优化之后的 CPC 参数见表 2。

表 1 ZEMAX 输入参数

Tab.1 Input parameters in ZEMAX

Parameters	Value
Power of the source/W	1
Type of IR source	Thermal infrared emitters (Lambertian source)
Detector size/mm ²	7.2×5.6
Number of analyzing rays	10 000 000
IR source size/mm ²	2.1×1.8
Distance from light source to CPC/mm	0.5
Distance from CPC to detector/mm	20

表 2 CPC 优化后的参数

Tab.2 Optimized parameters of CPC

Parameters	Value
Radial aperture/mm	1.79
Angle/(°)	22.86
Length/mm	9.99

基于表 2 中 CPC 优化结果以及 1.2 节的 CPC 理论模型, 计算出 CPC 的纵剖面坐标解析式:

$$z(x) = -2.375x - 3.313 \sqrt{-15.521x + 71.846} + \dots + 26.238 \quad (12)$$

将公式 (12) 导入数控机床加工出如图 2(b) 所示的 CPC。

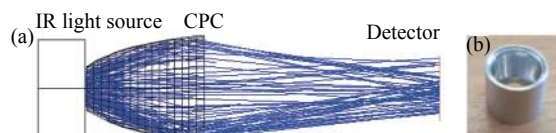


图 2 (a)CPC 聚光系统的优化结果; (b) 铝制 CPC

Fig.2 (a) Optimization results of the CPC focusing system; (b) Aluminum CPC

2.2 样机设计

基于上文的模拟结果,建立了如图 3(a) 所示的 3D 模型。从图 3(a) 中可见,安装在光源之后的 CPC,可将光源发出的光线聚焦到位于呼吸管正对面的探测平面上,同时,它们都被铝制支撑结构固定在呼吸管的进、出光口。

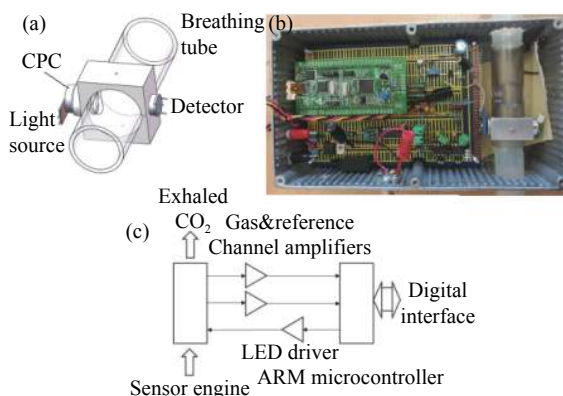


图 3 (a) 安装了 CPC 的信号采集系统(气体腔室);(b) 呼吸 CO₂ 监测系统;(c) 监测系统主要部分示意图

Fig.3 (a) Signal acquisition system (gas chamber) with CPC; (b) Respiratory CO₂ monitoring system; (c) Schematic diagram of the main parts of the monitoring system

设计的呼吸 CO₂ 监测系统样机主要包括四部分:(1) 由呼吸管、CPC、LED 红外光源和 PbSe 探测器组成的信号采集系统;(2) 信号调制及放大电路;(3) STM32F100 (STMicroelectronics Inc.) 微控制器,集成了高性能的 ARM[®]Cortex[®]-M3 数据处理模块以及用于存储测量数据的高速嵌入式存储器;(4)PC 和样机之间的数据通信端口 (USART 接口)。样机中使用的红外光源 (Gas sensing solutions Inc.) 可以辐射出 3.3~5.3 μm 波段的红外光。此外,探测器选用的是四通道光电导红外探测器 (MBXP-15-4 from OPTO DIODE, USA), 每个通道有效探测面的尺寸皆为 1 mm×1 mm。文中仅使用该探测器中心波长为 4.26 μm 滤波器(半功率宽为 70 nm)的 CO₂ 通道,和用以补偿温度和湿度等环境变化的安装有中心波长为 3.85 μm 滤波器(半功率宽为 100 nm)的参考通道。

如图 3(c) 所示,气体信号通道与参考通道的信号通过调理、放大电路之后分别进入 ARM 微控制器的两个模数转换通道并进行数字信号的解调、降噪等处理环节。ARM 微控制器以及光源驱动电路使该红外

LED 产生约 1 kHz 的高频红外光辐射。此外,微控制器能同时对信号进行采样并且实时计算 CO₂ 浓度值,该值通过 USART 端口传输到 PC 端的用户界面 (GUI) 以便进行数据可视化以及相关诊断算法的执行。

为了方便对比,利用 ZEMAX 设计了针对 20 mm 探测距离而优化的两款常用的聚光器:圆管聚光器,圆锥聚光器。优化设计时,将它们的外形尺寸限制在同一水平。

图 4 所示为三类聚光器的模拟图、加工样品实物(其材料皆为铝材),以及光电导红外探测器。图中聚光器底部的中心为红外 LED 光源,这三个聚光器之间相互独立,并且易拆卸,便于监测系统切换不同的腔室光学结构。

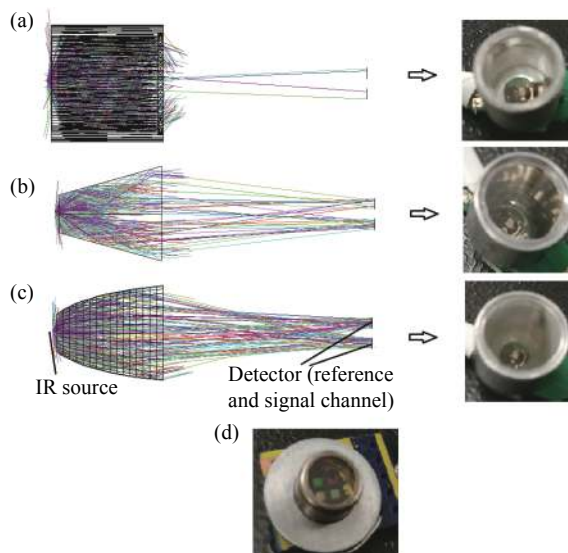


图 4 (a) 圆管聚光器;(b) 锥形聚光器;(c) 复合抛物面聚光器在 ZEMAX 中的光线追迹图及其加工实物图;(d) 腔室光电导红外探测器

Fig.4 (a) Straight cylinder concentrator; (b) Cone concentrator; (c) compound parabolic concentrator ray trace using ZEMAX, and samples of them; (d) Photoconductive infrared detector of the chamber

3 实验

3.1 CPC 聚光效果验证实验

在验证实验中(实验是在 23 °C 室温,标准大气压环境下的暗室进行的),采用的是图 5(a) 所示的黑体辐射光源,它的辐射光波段为 1~14 μm,该 CMOS 探测器(像元尺寸为 4.5 μm,感光面像素数为 1 600×1 200)可以探测 0.3~1.1 μm 波段的光信号。如图 5(b) 所

示,为该验证实验的实验环境,波形发生器的方波信号进入电源驱动的光源调制电路,该电路输出的光源调制信号驱动光源发出光线,光线经由 CPC 汇聚被探测器接收,探测器接收到的信号可在 PC 端查看储存。

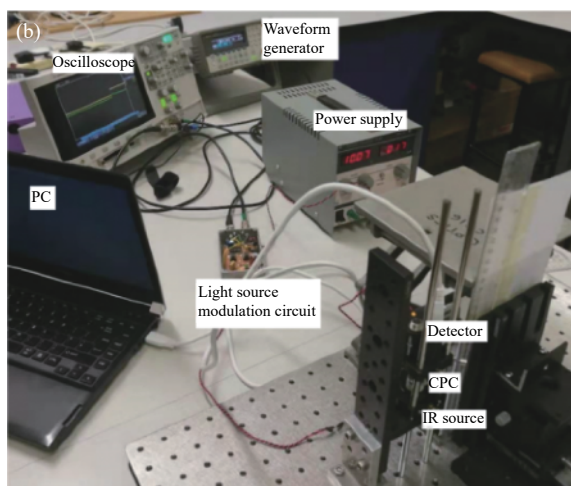


图 5 (a) CMOS 探测器 (Point Grey Research, Inc)(左)以及红外光源 EMIRS200(Axetris)(右); (b)CPC 验证实验环境

Fig.5 (a) CMOS detector(Point Grey Research, Inc) (left) and IR source EMIRS200(Axetris)(right); (b) Environment of CPC verification experiment

3.2 CO₂ 浓度标定实验

实验中使用的气体为 BOC 公司生产的 CO₂ 与 N₂。图 6 所示为标定实验的实验环境 (标定实验是在室温 21 ℃, 标准大气压下进行的)。通过多气体控制台内的 N₂ 流量控制仪 (MFC) 和 CO₂ 流量控制仪调节气体流量, 两种气体在后段气体管道内充分混合后进入冷却系统 (内有除湿机构), 管道末端的排风扇将冷却后的混合气体引入监测系统的光学腔室内, 光源出射的光线穿过混合气体 (被吸收部分光能量) 后被探测器接收, 探测器的输出信号通过信号放大电路后进入 ARM 微控制器进行模数转换和信号解调, 解调后的信号被输进示波器中, 得到 CO₂ 波形的实时变化图形。

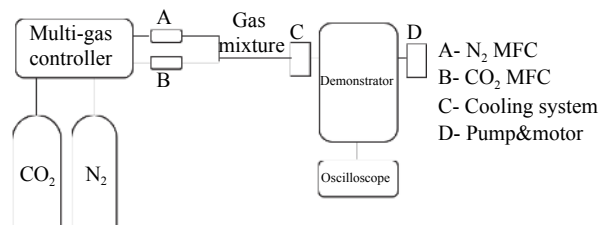


图 6 标定实验环境示意图

Fig.6 Calibration experiment environment diagram

分别将三种聚光器安装进监测系统的光室内, 通过多气体控制台产生不同浓度的 CO₂ 混合气体, 对监测系统浓度进行标定实验。

4 模拟及实验结果分析

4.1 CPC 模拟结果和实验结果对比

图 7(a) 为 CPC 光路系统中探测器模拟结果, 图 7(b)

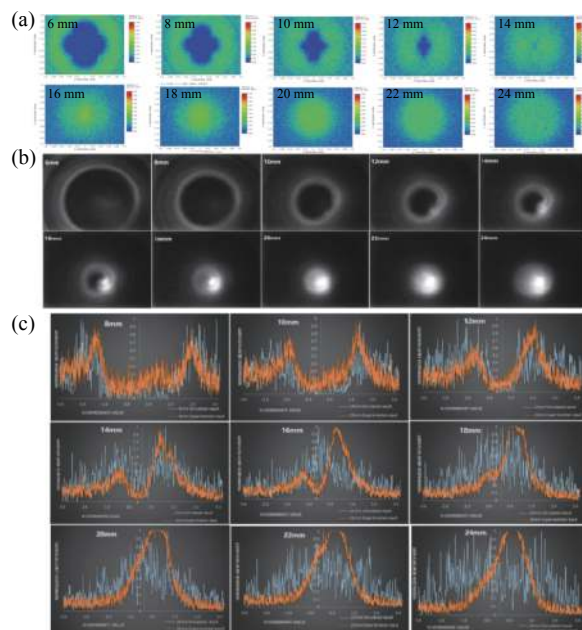


图 7 在 CPC 与探测器不同距离时, (a) ZEMAX 模拟获得的探测器上光斑图; (b) 验证实验中由 CMOS 探测器捕获的光斑图; (c) CPC 与探测器不同距离时模拟结果 (银色) 与实验结果 (橘色) 的归一化的光斑截面光亮度分布比较

Fig.7 When the CPC and the detector are at different distances, (a) Spot pattern on the detector obtained by ZEMAX simulation; (b)Spot pattern captured by the CMOS detector in the verification experiment; (c) Comparison of the normalized light spot cross-section brightness distribution between the simulation results (silver) and experimental results (orange) at different distances between the CPC and the detector

为验证实验中探测器接收的信号,图 7(c) 为模拟结果与实验验证结果之间的比较。结果表明,当 CPC 与探测器距离为 8 mm 时,光斑呈光圈状,这是由于光源发出的光大部分都直接经由 CPC 的内壁反射,偏离最佳聚焦距离的探测器接收到这些被反射的光后显示为光圈,而探测器接收的从光源直接出射的光线数量相较经过反射的光线数量比较少,因此,探测器上显示为一个亮圈。当探测器逐渐向最佳聚焦距离靠近时,亮圈逐渐向中心聚拢,当探测器处于最佳聚焦距离(20 mm)时,亮圈聚拢为一个亮斑,当距离为大于 20 mm 时,亮斑逐渐发散。因此,CPC 聚光效果满足设计需求。

由于 CPC、支撑结构以及呼吸管存在一定的加工误差;光源、CPC 与探测器之间存在一定的不同轴现象;并且模拟光源与实际光源存在一定的偏差,因此验证实验的结果与模拟得到的结果很难完全拟合。但值得一提的是,在 CPC 与探测器的距离为 20 mm

时它们都表明 CPC 具有超越其他距离下的良好聚光性能。这对文中研究的主流式 CO₂ 监测仪的信号采集系统来说是最为重要的一点。

4.2 聚光器模拟结果分析

表 3 为三种不同结构的聚光器光学效率模拟结果,该结果显示 CPC 的光学效率是锥形聚光器的 3.58 倍,是圆管聚光器的 89.77 倍。图 8 是探测器接收到的光线分布图,从图中亦可以看出 CPC 后的探测器接收到的光线数量明显大于其他两种光学结构后的探测器所接收到的。

表 3 三种结构的光学效率模拟结果

Tab.3 Optical efficiency simulation results of three structures

Type	Light efficiency
Straight cylinder concentrator	0.047%
Cone concentrator	1.2%
Compound parabolic concentrator	4.3%

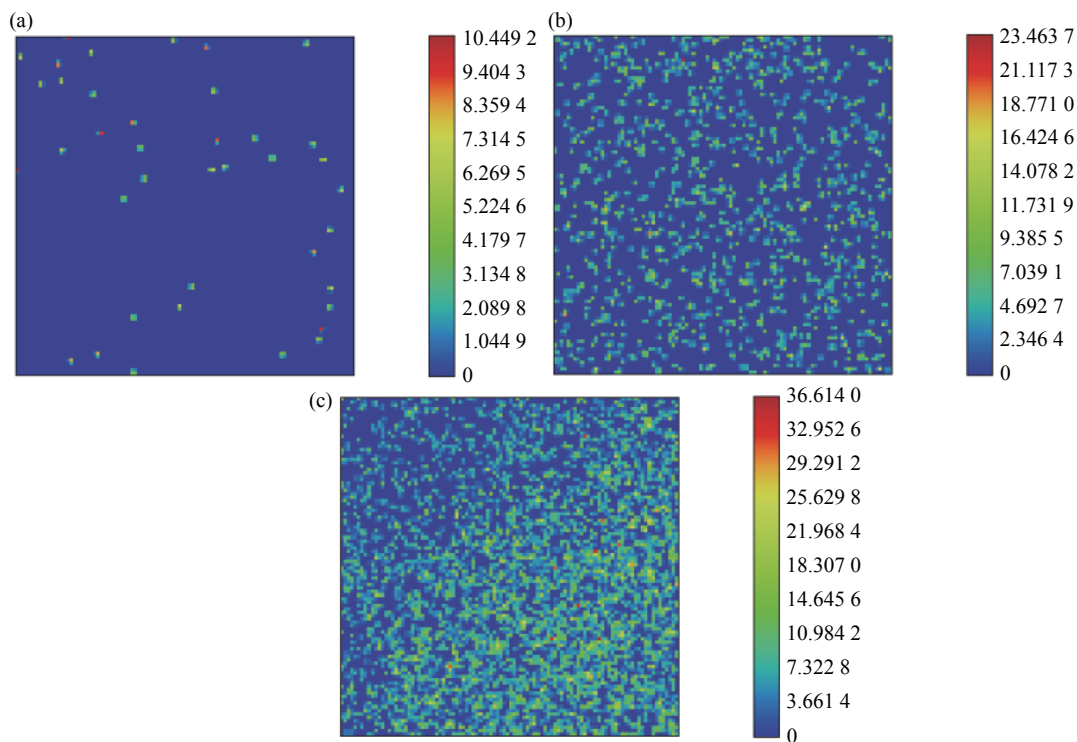


图 8 (a)圆管聚光器,(b)锥形聚光器,(c)复合抛物面聚光器在信号通道探测器上的光线分布图

Fig.8 (a)Straight cylinder concentrator,(b)cone concentrator,(c)light distribution of compound parabolic concentrator on the signal channel detector

图 8 和表 3 的模拟结果都表明,相较于其他两种常用聚光器,CPC 具有最佳的聚光性能,其抛物面型的内壁可以将相当一部分光线反射至目标探测面,由

于目标探测面尺寸微小且离聚光器有一定的距离,因此锥形聚光器其锥形内壁只有小部分环带可以将光线反射至探测面。而圆管聚光器由于其内壁平行于

主光轴,因此经由内壁反射至探测面光线的数量受限于聚光器与探测面的距离大小,由于文中研究的主流式 CO₂ 监测系统的该距离大小为 20 mm,因此,当光学腔室结构为圆管聚光器时,经由内壁反射的光线损失了绝大部分,探测面接收到的光线多为光源直接出射的光。

4.3 CO₂ 浓度标定实验结果分析

由于监测系统对光源辐射的非均匀响应特性、红外光源辐射能量不稳定以及红外传感器放大电路非线性等因素的影响,使得利用 Beer-Lambert 定律对 CO₂ 浓度标定结果存在一定的偏差,因此在文中,整个监测系统被视为一个整体,通过对标定实验获取监测系统数据,并将它和的 CO₂ 与 N₂ 的混合气体浓度进行最小二乘拟合,从而确定监测系统处理最终值与 CO₂ 浓度的对应关系,计算出当前时刻人体呼吸 CO₂ 浓度值。

根据林喆^[14]针对此问题建立的检测模型以及实验结果显示,在校准温度下,三阶多项式拟合为最小二乘建模时的最佳模型,其数学表达式如下:

$$V = a \cdot C^3 + b \cdot C^2 + c \cdot C + d \quad (13)$$

式中: V 为从监测系统获得的实验结果; C 为 CO₂ 浓度; R^2 为拟合校准系数。由实验得到的监测系统数据处理最终值与 CO₂ 浓度的拟合关系系数和拟合校准系数见表 4。

表 4 系统输出值与 CO₂ 浓度的三阶多项式拟合系数及校准系数

Tab.4 Third-order polynomial fitting coefficient and calibration coefficient of system output and CO₂ concentration

Type	a	b	c	d	R^2
Straight cylinder	0.000 70	-0.148 7	10.494	24.943	0.969 9
Cone	0.001 5	-0.314 8	22.866	52.963	0.978 1
CPC	0.001 1	-0.262 3	24.033	68.779	0.985 3

4.3.1 灵敏度对比

正常人体潮气末 CO₂ 浓度一般为 50 000 ppm,基于 10 000~73 000 ppm 浓度范围的 CO₂ 浓度标定结果可得到图 9 所示线性拟合曲线。

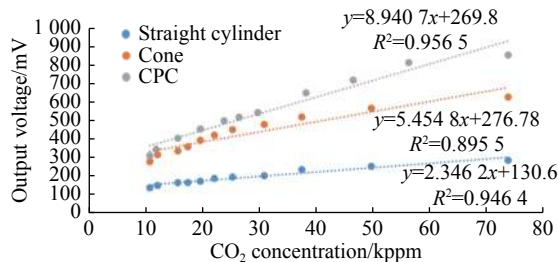


图 9 10 000~73 000 ppm CO₂ 浓度范围内,三种结构对应的系统的输出信号与 CO₂ 浓度的关系

Fig.9 Relationship between the output signals of three systems corresponding to the CO₂ concentration in the range of 10 000 ppm to 73 000 ppm CO₂ concentration

图 9 显示了在 10 000~73 000 ppm 的所有浓度标定实验数据,可以看出三种结构对相同 CO₂ 浓度的响应程度并不一致,由于它们的线性拟合曲线线性度较高,因此,其斜率直接反应出了当前结构对 CO₂ 浓度响应的灵敏度。在浓度标定实验中, C_t 、 C_{t-1} 分别表示不同的浓度的 CO₂ 混合气体; V_t 、 V_{t-1} 分别表示对应的样机输出信号值。灵敏度定义为:

$$\kappa = \frac{\|C_t - C_{t-1}\|}{\|V_t - V_{t-1}\|} \quad (14)$$

由公式 (14) 可得不同光学腔结构的监测系统灵敏度分别为:圆管聚光器: $\kappa_{cyl} = 2.346 2$,锥形聚光器: $\kappa_{cone} = 5.454 8$,CPC: $\kappa_{CPC} = 8.940 7$,其量纲为 1 000 ppm/mV。安装 CPC 光学腔的样机其灵敏度是安装圆管聚光器光学腔监测系统的 3.811 倍,是安装锥形聚光器光学腔监测系统的 1.639 倍。这表明,对于相同浓度的 CO₂,安装 CPC 的系统相对其他两种结构而言会返回更高的输出电压,因此,它可以对更微小的 CO₂ 浓度变化做出响应。

4.3.2 信噪比对比

进行浓度标定实验时,由于样机系统中存在 1/f 噪声,白噪声,以及高斯噪声,它们的存在会直接影响到样机可测量的最低 CO₂ 浓度值。因此,确定样机的信噪比参数是十分必要的。文中利用公式 (15) 和 (16) 计算混合噪声的 RMS 值。

$$Signal_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{n=i}^N Signal_i^2 \right)} \quad (15)$$

$$Noise_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{n=i}^N Signal_i - Signal_{avg} \right)^2} \quad (16)$$

利用公式 (17) 计算分别安装三种光学腔结构的样机其信噪比。

$$SNR = \frac{Signal_{RMS}}{Noise_{RMS}} \quad (17)$$

表 5 为监测系统安装三种光学腔结构后的信噪比, 可以得出, 安装 CPC 后系统的信噪比是安装圆管聚光器系统的 1.926 倍, 是安装锥形聚光器系统的 1.433 倍。由于安装 CPC 的系统具有更高的灵敏度, 且其信噪比也是最高的, 因此, 相对其他两种结构而言, 它可以测量出更低的 CO₂ 浓度值。

表 5 监测系统分别安装三种结构后的信噪比

Tab.5 Signal-to-noise ratio of the monitoring system after installing three structures

Type	SNR
Straight cylinder	12.8
Cone	17.2
CPC	24.65

4.3.3 呼吸 CO₂ 波形图

对具有最佳性能的安装 CPC 光室的样机进行呼吸 CO₂ 浓度测试, 当对人体进行呼吸监测时, 管道适配器中潮湿的水蒸气 (文中在冷却系统中有除湿机构, 因此短时间内的测量基本不受水蒸气影响) 和快速变化的呼吸气流会对 CO₂ 浓度测量产生极大的干扰, 导致最后 CO₂ 浓度出现偏差。

为了验证该样机系统的实用效果, 对两位健康测试者进行呼吸 CO₂ 浓度的实时监测实验。实验前使测试者放松状态, 避免有意识的控制呼吸节奏。对两位被测者进行的呼吸 CO₂ 监测, 实验表明, 该样机具有良好的响应速度, 信噪比和灵敏度。图 10 为其中一位被测者的呼吸二氧化碳波形图, 该图清晰的显示了呼吸 CO₂ 浓度变化规律以及 EtCO₂ 等特征信息。

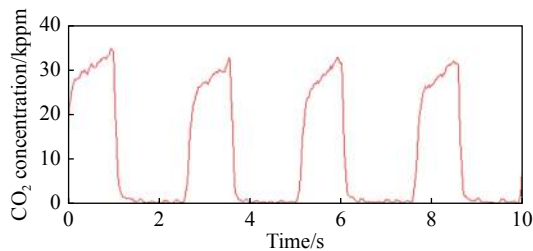


图 10 CO₂ 波形图

Fig.10 CO₂ waveform

5 结 论

文中提出利用 CPC 提升主流式呼吸 CO₂ 监测系统性能, 对 CPC 进行了优化、模拟和验证实验, 结果表明模拟结果与实验结果具有良好的一致性; 搭建了监测系统, 并对圆管聚光器、锥形聚光器、CPC 分别进行了模拟和对比试验, 模拟结果与实验结果表明, 比之圆管聚光器, CPC 可使光室的光学效率提升 89.77 倍, 使系统的灵敏度提升 3.811 倍, 信噪比提升 1.926 倍; 比之锥形聚光器, 可使光室光学效率提升 3.58 倍, 使系统灵敏度提升 1.639 倍, 信噪比提升 1.433 倍。光室内安装 CPC 可使样机分辨更微小的 CO₂ 浓度变化, 测量更低的 CO₂ 浓度值。对监测系统进行的实时人体呼吸 CO₂ 浓度测试结果表明, 该样机具备良好的响应速度、信噪比以及灵敏度, 这对进一步研发微型化高性能主流式呼吸 CO₂ 监测仪具有很好的参考价值。

参考文献:

- [1] Lu Weiye, Zhu Xiaorui, Li Yuesheng, et al. Comparison of direct absorption and wavelength modulation methods for online measurement of CO₂ by TDLAS [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0717002. (in Chinese)
- [2] Lv Shuyuan, Du Shaoyong. Detection system of CO₂ using hollow-core crystal fiber based on LabVIEW [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1117002. (in Chinese)
- [3] Vaessen P H B, Knappe J T A. An evaluation of the Integrated Pulmonary Index (IPI) for the detection of respiratory events in propofol sedated patients undergoing upper gastrointestinal endoscopy [J]. *Journal of Hepatology and Gastrointestinal Disorders*, 2016, 2(2): 117-128.
- [4] Cinar O, Acar Y A, Arziman İ, et al. Can mainstream end-tidal carbon dioxide measurement accurately predict the arterial carbon dioxide level of patients with acute dyspnea in ED [J]. *The American Journal of Emergency Medicine*, 2012, 30(2): 358-361.
- [5] Singh B S, Gilbert U, Singh S, et al. Sidestream microstream end-tidal carbon dioxide measurements and blood gas correlations in neonatal intensive care unit [J]. *Pediatric Pulmonology*, 2013, 48(3): 250-256.
- [6] 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.

- [7] Han J H, Han S W, Kim S M, et al. High detection performance of NDIR CO₂ sensor using stair-tapered reflector [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(8): 3090–3097.
- [8] Zhang G, Wu X. A novel CO₂ gas analyzer based on IR absorption [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 42(2): 219–231.
- [9] Ashraf S, Mattsson C G, Thungström G, et al. Evaluation of a CO₂ sensitive thermopile with an integrated multilayered infrared absorber by using a long path length NDIR platform[C]//2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). IEEE, 2018: 1–6.
- [10] Tian M, Su Y, Zheng H, et al. A review on the recent research progress in the compound parabolic concentrator (CPC) for solar energy applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 1272–1296.
- [11] Welford W T. High Collection Nonimaging Optics[M]. US:Elsevier, 2012.
- [12] Wang Le, Zhang Shusheng, Zhai Jing. Modeling of LED reflector cup based on compound parabolic concentrator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012(10): 24.
- [13] Vincent T A, Gardner J W. A low cost MEMS based NDIR system for the monitoring of carbon dioxide in breath analysis at ppm levels [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 236: 954–964.
- [14] Lin Zhe. Research and development of non-dispersive infrared CO₂ gas concentration analyzer[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2008.(in Chinese)