

大气监测中光纤气体传感器灵敏度的自动设定*

肖韶荣^{1,2}, 高志山¹, 朱日宏¹, 金建²

(1.南京理工大学电光学院, 江苏南京 210094; 2.南京信息工程大学电子工程系, 江苏南京 210044)

摘要:基于直角棱镜构成的吸收池用于大气监测光纤气体传感器中, 探测光束在吸收池内往返的次数 N 与过两个直角棱镜各自直角棱的对称面的间距 d 有关, 通过调节间距 d 实现测量灵敏度的调节。以吸光度差作为输出量, 根据其值的不同, 选择不同的间距 d 。在单片机系统控制下, 由步进电机实现间距 d 的自动给定, 同时将输出探测光束接收器送到指定位置。采用消色差透镜作为输出光束的接收透镜, 则间距 d 的调节精度对传感器灵敏度设定的影响可不考虑。

关键词: 光纤气体传感器; 灵敏度调节; 单片机控制技术

中图分类号: O433.5⁺1; TN219 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)02-0248-05

Automatic setting of sensitivity in atmospheric monitor sensor with optical fiber*

XIAO Shao-rong^{1,2}, GAO Zhi-shan¹, ZHU Ri-hong¹, JIN Jian²

(1.School of Electronic and Optics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2.Department of Electronic Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Absorption cell based on rectangular prism is used in atmospheric monitor sensor with optical fiber. Times of probing beams propagating back and forth in the cell is determined by distance between symmetry planes through respective apexes of the prisms. The sensitivity of sensor is set by means of adjusting the distance. Taking difference of absorbance for output, the distance is adjusted at different amount of absorbance. The distance is set automatically by step motor under a mono-computer control system, and the receiver of output light beams is moved at corresponding place. An achromatic lens is taken for receiving lens, so that error of adjusting the distance can't affect the setting of sensitivity obviously.

Key words: Fiber gas sensors; Adjustment of sensitivity; Mono-computer control technology

0 引言

用于大气实时监测中的光纤光谱吸收式气体传

感器的检测灵敏度除了与光电器件的灵敏度和后续电子线路的性能参数有关外, 主要决定于监测区域探测光束与待测气体的相互作用长度。在大气监测系统

收稿日期: 2004-04-05; 修订日期: 2004-05-15

* 基金项目: 江苏省高校自然科学基金资助(02KJB510006)

作者简介: 肖韶荣(1958-), 男, 江西新干人, 教授, 硕士, 主要研究方向为激光技术应用与信号处理。

中,对于清洁大气,探测光束经过被测区域后,光强度的改变十分微弱,此时进入光电探测器的光强虽然很大,但光强的改变量却难于检测。为提高检测灵敏度,常采用折返式吸收池来增加光在吸收池内的有效程长。而在浓雾天气,雾粒子的散射作用使得探测光强迅速减弱,光强的变化很大,光电探测器接收到的光强处于弱信号状态。虽然通过提高监测系统测量放大电路的放大系数可以改善灵敏度,但这需要性能优越的低噪声放大器。在户外,温度变化频繁且幅度较大,低噪声电子线路受温度影响较大。被测量的检测是通过测量光强的变化量实现的。检测过程中,希望有明显的光强变化而不希望光强成为微弱信号,而通过缩短光与待测气体的作用距离,即可提高进入探测器的人射光,从而提高测量系统的信噪比,降低对电子线路的性能要求。为适合实时测量,需要通过调节光与被测气体的相互作用距离实现灵敏度的自动调节。

典型的光学吸收池结构有 White^[1]型、Herriott^[2]型及各种改进型。一旦确定了吸收池结构参数,探测光束在吸收池内的有效光程亦被确定,很难调节。采用一种基于直角棱镜构成的吸收池^[3],可以很方便地调节其内探测光光程,本文介绍了一种适合此吸收池的自动调节探测光光程的方法。

1 大气监测气体传感器结构和工作原理

1.1 传感器吸收池结构

图1是基于D II -180°直角棱镜的气体吸收池的结构原理图,两个相同直角棱镜 D_1 、 D_2 的两个底面 F_1 、 F_2 平行放置,构成吸收池。探测光束经输入光纤

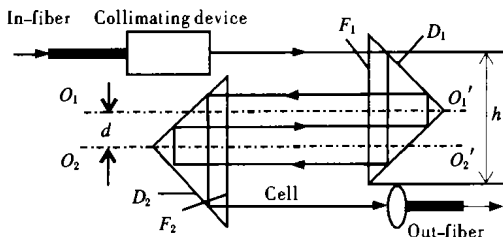


图1 基于直角棱镜的光纤光度传感器气室结构示意图

Fig.1 Construction of fiber gas sensor on the basis of rectangular prism

传送到准直装置,经准直后成为细平行光束,垂直入射到直角棱镜 D_1 ,由 D_1 反射后,垂直入射到直角棱镜

D_2 ,又被 D_2 反射,再次垂直入射到 D_1 ,如此在 D_1 、 D_2 间多次往返,再由输出光纤输出。为讨论方便起见,把沿图中所示方向传播的光束称为前向光束。应注意的是,当光束往返次数为偶数时,光束将在入射光束附近沿相反方向输出,此光束称为反向光束。

1.2 传感器的光传输特性

探测光束在吸收池内往返的次数 N 与过直角棱镜 D_1 、 D_2 各自直角棱的两对称面的间距 d 有关。在光束直径比间距 d 小时,探测光束在吸收池内往返的次数 N 为^[4]:

$$N = \text{int} \left[\frac{h}{d} \right] + 2 \quad (1)$$

式中 h 为入射光束到直角棱镜 D_1 底部45°角棱边的距离。调节间距 d ,即可调节探测光束在吸收池内往返的次数 N 。

探测光束在吸收池内的有效光程为:

$$L = Nl = \left[\text{int} \left(\frac{h}{d} \right) + 2 \right] l \quad (2)$$

式中 l 为直角棱镜 D_1 、 D_2 的两个底面 F_1 、 F_2 间的距离。吸收池输出光的强度为从吸收池输出的前向光束的强度 $I_f(\lambda)$ 与探测光束每次穿过界面 F_1 、 F_2 反射光强度 $I_r(\lambda)$ 之和,可表示为:

$$I_{\text{out}}(\lambda) = I_r(\lambda) + I_f(\lambda) \quad (3)$$

前向光束的强度为:

$$I_f(\lambda) = I_0(\lambda) \tau^{2N-2} e^{-N\alpha(\lambda)cl_0} \quad (4)$$

在实际应用中,令其中一个直角棱镜略倾斜,使前向光束与反射光束分离,在测量光束接收端,利用光纤端面作为孔径光阑限制非近轴光束即反射光束等进入探测器^[5]。因此,输出光束仅为前向光束,即输出光强为:

$$I_{\text{out}}(\lambda) = I_0(\lambda) \tau^{2N-2} e^{-N\alpha(\lambda)cl_0} \quad (5)$$

公式(5)为基于直角棱镜构造的吸收池的光强传输方程,即单波长测量方式的测量方程。

1.3 差分测量方式传感器的灵敏度

通常情况下,测量区域可能存在其他种类的气体,

探测光束不但受到待测气体的吸收和散射,而且还受到干扰气体的作用,此外光束在传输过程中还受到光学元件材料的吸收与散射及其表面的影响,致使传感器检测的准确度和长期可靠性受到影响。采用差分光度分析法进行测量可有效抑制这些因素的影响,提高检测精度和长期可靠性。

设测量光束的波长为 λ , 参考光束的波长为 λ_r , 待测气体对测量光束和参考光束的摩尔吸收系数分别为 $\alpha(\lambda)$ 和 $\alpha(\lambda_r)$ 。以参数 $\beta(\lambda)$ 和 $\beta(\lambda_r)$ 分别描述测量光束和参考光束在传输过程中除被待测气体吸收外的所有其他作用引起的损耗。

吸收池输出的测量光束光强可表示为:

$$I_{out}(\lambda) = I_0(\lambda) e^{-N\alpha(\lambda)cl_0 - \beta(\lambda)} \quad (6)$$

吸收池输出的参考光束光强可表示为:

$$I_{out}(\lambda_r) = I_0(\lambda_r) e^{-N\alpha(\lambda_r)cl_0 - \beta(\lambda_r)} \quad (7)$$

令测量光束和参考光束以同一光路传输,且测量光波长与参考光波长相近,则损耗因子 $\beta(\lambda) \approx \beta(\lambda_r)$, 由此可将待测气体浓度表述为:

$$c = \frac{1}{Nl_0 [\alpha(\lambda) - \alpha(\lambda_r)]} \ln \frac{I_0(\lambda) I_{out}(\lambda_r)}{I_0(\lambda_r) I_{out}(\lambda)} \quad (8)$$

引入吸光度差:

$$\delta A = A - A_r = \ln \frac{I_0(\lambda)}{I_{out}(\lambda)} - \ln \frac{I_0(\lambda_r)}{I_{out}(\lambda_r)} \quad (9)$$

或

$$\delta A = Ncl_0 [\alpha(\lambda) - \alpha(\lambda_r)] \quad (10)$$

式中 A 和 A_r 分别为测量光束和参考光束的吸光度, 公式(10)表明待测气体浓度不变时,吸光度差与吸收池内探测光束折返的次数 N 成正比。

由以上分析得出以吸光度差表示的差分测量方程:

$$c = \frac{\delta A}{Nl_0 [\alpha(\lambda) - \alpha(\lambda_r)]} \quad (11)$$

吸收池的灵敏度为:

$$S_{\text{差分}} = \frac{\Delta(\delta A)}{\Delta c} = Nl_0 [\alpha(\lambda) - \alpha(\lambda_r)] \quad (12)$$

在气体传感器中,待测气体浓度很低时,若作用长度较短,探测光束经过吸收池后的输出光强受待测气体影响很小,其强度几乎不随气体浓度而变。因此,在低浓度情况下,很难通过改变电子线路的传输系数来提高检测灵敏度,而由公式(12)可知,吸收池内探测光束折返的次数 N 却对灵敏度有较大的影响。

2 传感器灵敏度自动设定

2.1 监测系统原理结构

气体监测系统工作原理框图如图 2 所示。波长分别为 λ 和 λ_r 的光束变换到同一光路传输,经过吸收池后传送到光接收器,再由光分波器分别送到带前置放大器的探测器 1 和探测器 2,光信号被转换为电信号,经调理并被转换为数字信号,最后被单片机系统采集。单片机系统根据采集到的吸光度差,对是否需要调节距离 d 做出判断。

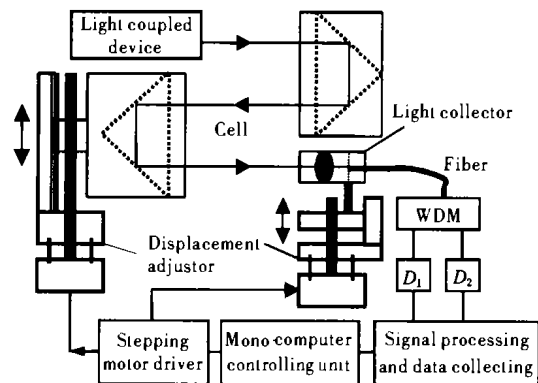


图 2 大气监测系统工作原理框图

Fig.2 Schematic of atmospheric monitor system

2.2 监测系统灵敏度自动设定的实现

根据不同的检测对象,设定某一吸光度差作为启动调节的阈值条件。吸光度差大于此阈值时,调节装置将使传感器系统置于正常工作状态,此时探测光束在吸收池内往返 3 次,其灵敏度最低;吸光度差小于此阈值时,单片机系统给出驱动信号,使位移调节装置工作,自动调节 d ,并驱动光接收器移动到相应位置。

实验中,直角棱镜的底边长约为 56 mm,探测光束直径约为 1.5 mm,为防止探测光束在池内传播时产生分裂现象,限制最小间距 $d=3$ mm。为充分利用棱镜的作用,探测光束的入射位置设定在 D_1 棱镜的

上部棱边附近,设 $h=52\text{ mm}$,由公式(1),探测光在腔内往返的最大次数为:

$$N_{\max}=\text{int}\left(\frac{h}{d}\right)+2=19 \quad (13)$$

取最小往返次数为 3 时对应间距 d 为 28.0 mm 。在图 1 所示结构中,采用了前向光束,探测光往返的次数 N 为奇数,不同的 N 所对应的间距 d 和输出光束的位置 H 如表 1 所示,表中 H 为输出光束与入射光束的间距。

表 1 不同间距下输出光位置与池内探测光往返次数
Tab.1 Times of probing light back and forth in the cell at different displaces

N	19	17	15	13	11	9	7	5	3
d	3.00	3.40	3.80	4.50	5.50	6.80	9.20	14.0	28.0
H	54.0	54.4	53.2	54.0	55.0	54.5	55.2	56.0	56.0

以水气吸收为例,探测光波长 $\lambda=1.37\text{ }\mu\text{m}$,参考光波长 $\lambda_r=1.31\text{ }\mu\text{m}$ 。设定最小吸光度差为 $\delta A_{\min}=0.01$,假定被测场合水气吸光度差上限不大于 $\delta A_0=0.5$ 。系统开始工作时,给定间距 d 的最大距离为 28.0 mm ,使得探测光在腔内往返的次数为 3;若 $\delta A>0.01$,则单片机系统控制间距 d 保持为 28.0 mm ;当 $\delta A<0.01$ 时,置 $d=14.0\text{ mm}$;若 $0.01<\delta A<0.5$,则间距 d 保持 14.0 mm ;若 $\delta A>0.01$ 且 $\delta A>0.5$,则回到上一个间距。通常,当间距 d 变小至某个位置 d_i ,吸光度差大于上限 $\delta A=0.5$ 时,单片机控制系统调节间距 d 退回至比 d_i 大的第一个位置 d_{i+1} ,否则间距 d 保持在 d_i 位置。若间距 d 经过一系列调节,最后 $d=3.0\text{ mm}$,仍然是 $\delta A<0.01$,则系统直接报告待测气体浓度为零或小于某个对应浓度值。传感器灵敏度的自动设定过程如图 3 所示。

3 结果与讨论

实际调节表明,由于惯性和螺距误差的原因,间距 d 在表 1 中给定位置附近作微小变化时,探测光束在吸收池内往返的次数不变,但输出光束的位置发生了明显变化。在间距较大处, N 不变,间距 d 可微调的范围更大,达数毫米,最小间距处,允许微调范围约 0.20 mm ,这一精度是可以保证的。这说明,直角棱镜

D_2 的位置调节精度或重复性对探测光束在吸收池内的折返次数无影响。调节精度导致输出光束位置的变化,使输出光束在接收透镜上的位置发生变化,从而影响输出光束与光接收器之间的耦合。实验中,在辅以相应调节的情况下,光斑在接收透镜上的位置变化被限制在 $\pm 0.5\text{ mm}$ 以内。采用长焦距透镜使输出光束的光轴在接收光纤端面上的入射角近似相等。实验装置接收透镜焦距 $f=30\text{ mm}$,在测试条件不变的情况下,光斑在其光轴附近两侧 $\pm 0.5\text{ mm}$ 内移动时,光纤输出光强的变化不超过 1.0% ,吸光度变化约为 7.0% 。另一方面,考虑到测量光与参考光传输的光路相同,且为同时传输,因此,间距 d 设定的精度对两种波长输出光束与接收光纤间的耦合系数的影响主要来自透镜的色差,故接收透镜选用了消色差透镜。

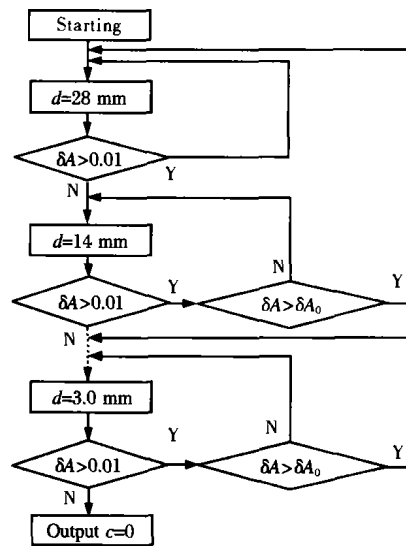


图 3 单片机控制系统工作流程

Fig.3 Flow chart of mono-computer servo system

图 4 是水气浓度不变的情况下,设定最小吸光度差为不同值时,系统自动调节灵敏度的测试结果。吸

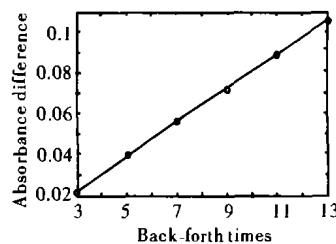


图 4 不同灵敏度的测试结果

Fig.4 Measurement absorbance difference at different sensitivity

光度差 δA 与探测光束在吸收池内的折返次数呈良好的线性关系,与公式(12)的分析结果一致。

在实时测量中,环境温度的改变及震动等现象是不可避免的,传感器可能产生形变,参考文献[4]已作了详细讨论。

4 结束语

在基于直角棱镜的光纤气体传感器中,利用单片机控制系统调节间距 d 便于实现灵敏度的自动设定,对间距 d 的调节精度要求不高。对差分测量工作方式,选择消色差透镜作为吸收池输出光的接收透镜可不考虑间距 d 的调节误差对灵敏度设定的影响。

(上接第 243 页)

列。这些图像序列已经用于目标识别、跟踪算法的设计与评估中,并可根据实际要求进行相应的修改,解决了红外图像处理中图像源难以获得的问题。

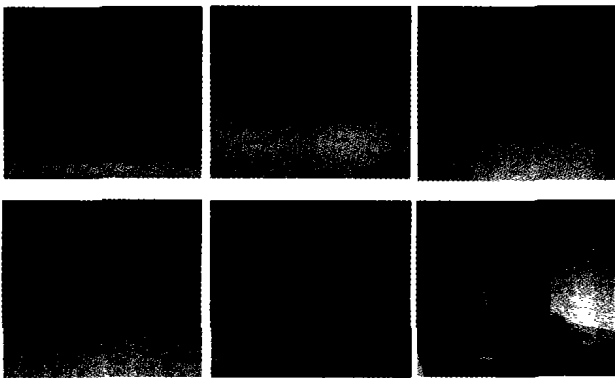


图 6 红外仿真图像序列

Fig.6 Infrared simulation image sequence

4 结束语

场景仿真是一个庞大、复杂的系统工程,尤其是红外仿真,相对于较成熟的可见光仿真更为复杂,专业性也更强。本文对红外仿真技术进行了研究,较为详细地介绍了红外复杂场景的仿真过程,给出了仿真

参考文献:

- [1] 刘英同.长光程大气模拟仓试验装置[J].激光与红外,1999,29(4):216-217/220.
- [2] Ronald S I, McAndrew J J F. Application of tunable diode laser absorption spectroscopy to trace moisture in gases[J].Anal Chem, 1994, 66(15):2471-2479.
- [3] 肖韶荣,陈进榜,何勇.一种气体传感器吸收池的光传输特性[A].第九届全国光学测试学术讨论会论文集[C].2001.178.
- [4] 肖韶荣,陈进榜,朱日宏,等.于直角棱镜的光纤光度传感器[J].中国激光,2004,31(12):1513-1517.
- [5] Shaorong Xiao, Jinbang Chen, Zhenhui Wang, et al. A new set of measuring terrain atmospheric visibility with optical fiber[A].SPIE [C].2002, 4920.187-192.

结果。通过实际的检验,仿真的方法是有效的,达到了实际任务对图像仿真的要求。目前主要的工作包括:半实物仿真系统的实现以及仿真系统软件的研究开发,进一步提高图像的复杂性和仿真的置信度。

参考文献:

- [1] Onda D, Simmons, Stephen E Jacobs. Advancements in real-time IR/EO scene generation utilizing the silicon graphics Onyx2[A]. SPIE[C].2000,4027.134-144.
- [2] 吴亚平,张天序.红外图像的计算机仿真及仿真软件[J].红外与激光工程,2000,29(4):1-3.
- [3] 李丽荣,沈春林,陆宇平,等.在 SGI 图形工作站上实现低空突防三维视景及跨平台实时仿真[J].南京航空航天大学学报,2002,34(2):168-172.
- [4] 李桦,汤心溢,施家明,等.红外动态景象仿真中探测器效应的研究[J].量子电子学报,2001,18(12):20-26.
- [5] 宋志明,康凤举,唐凯,等.水下航行器视景仿真系统的研究[J].系统仿真学报,2002,14(6):761-764.