

基于双面金属包覆光波导传感器的 地铁 CO₂ 气体监测系统设计

陆 炎¹, 李胜永¹ 顾玉牧², 陶雨濛³, 孙春洋³, 李永豪¹

(1. 南通航运职业技术学院 交通工程系, 江苏 南通 226010; 2. 南通航运职业技术学院 管理信息系, 江苏 南通 226010;
3. 南京交通职业技术学院 轨道交通学院, 江苏 南京 211188)

摘 要: 地铁有害气体的监测对乘客安全至关重要, 为了提高地铁中 CO₂ 气体含量检测的灵敏度, 提出以双面金属包覆光波导结构为载体设计新型的 CO₂ 气体传感器作为检测终端。通过对导模的计算分析, 结果表明传感器具有极高的灵敏度。采用 ZigBee 无线通信技术设计地铁 CO₂ 气体监测系统, 给出了设计方案, 为地铁有害气体监测系统的工程实践提供的可供选择的方案。

关键词: 地铁; 双面金属包覆光波导; CO₂ 气体传感器; ZigBee; 监测系统

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1671-9891(2020)01-0029-05

0 引言

随着我国城市轨道交通的快速发展, 地铁已经成为我国公共交通服务体系中非常重要的组成部分。截至 2018 年, 中国内地累计有 35 个城市建成投运城市轨道交通线路 5 766.6 km^[1], 每天运送乘客高达数千万人次。地铁一般都位于地下, 与外界的空气交换只能通过车站的出入口和有限的隧道风井来进行^[231]。地下车站和列车车厢中人流的新陈代谢会产生大量 CO₂ 气体, 当其含量达到一定阈值后就会影响人的健康, 仅靠空气的自然流动和扩散是无法排除这些气体的, 因此对 CO₂ 含量的监测是地铁车站、列车隧道和车厢等场所重要的检测内容, 直接关系到乘客的安全和舒适感, 各大城市轨道交通企业和研究人员都投入了大量精力来进行各类气体监测相关的工程实践^[3]。

通过化学、光学等技术手段, 有多种方法可以检测 CO₂ 气体浓度^[4]。目前, 在城市轨道交通中比较常用的 CO₂ 气体传感器主要有两种: 固态电解质 CO₂ 传感器和红外线吸收式 CO₂ 传感器^[239]。固体电解质 CO₂ 传感器存在对气体选择性差、易出现误报、需要频繁校准、使用寿命较短等不足, 因而使用较少。而基于朗伯-比尔定律^[5]的红外线吸收式 CO₂ 传感器虽然使用广泛, 但其吸收谱峰会因 CO₂ 分子的剧烈运动而产生多普勒加宽, 造成谱线漂移和传感器灵敏度的下降。因此, 开发新型的高灵敏度 CO₂ 光学传感器十分必要。本文将采用双面金属包覆光波导结构设计 CO₂ 气体传感器, 波导谐振腔中激发的超高阶导模 (Ultrahigh-order Modes)^[6]会与腔体中流过的 CO₂ 产生相互作用而引起导模的变化, 通过探测光波导模式的改变就能反映出 CO₂ 气体浓度的变化。超高阶导模对被测样品的折射率和消光系数极其敏感^[7-8], 故这种新型的 CO₂ 传感器相较于传统的光学传感器具有更高的灵敏度, 并且还有体积小、结构简单、成本低、精致美观等优点, 可以设置在车厢、站台、区间隧道、值班室等人员活动区域。

本文还以提出的双面金属包覆光波导 CO₂ 传感器为末端检测节点, 结合 ZigBee 无线通信技术^[9]建立了城市轨道交通 CO₂ 气体监测系统并给出了设计方案。ZigBee 是一种新兴的近距离、低复杂度、低功耗、低速率、低成本的双向无线通信技术, 相较于传统的有线传输, ZigBee 技术具有成本低、安装方便、维护方便、多跳路由、可扩充性强、拓扑稳定等优点。本文研究内容将为城市轨道交通气体监测系统的升级优化提供一些思路和借鉴。

收稿日期: 2020-02-11

基金项目: 南通航运职业技术学院科技项目 (HYKY/2019B03); 南通市科技计划项目 (MS12018080)

作者简介: 陆炎 (1993—), 男, 江苏南通人, 南通航运职业技术学院交通工程系助教, 硕士。

1 双面金属包覆光波导与超高阶导模

双面金属包覆光波导结构如图 1 所示,该波导结构自上而下为薄金属银膜、玻璃层、样品池和厚金属银膜,其有两个显著特点,一个是采用毫米尺度(0.5~2 mm)的介质层作为导波层;另一个是采用约 30 nm 的薄金属银膜作为上层包覆层和约 300 nm 的厚金属银膜充当下层基底层,形成了一个类 Fabry-Perot 腔结构,即金属-介质-金属三层结构。

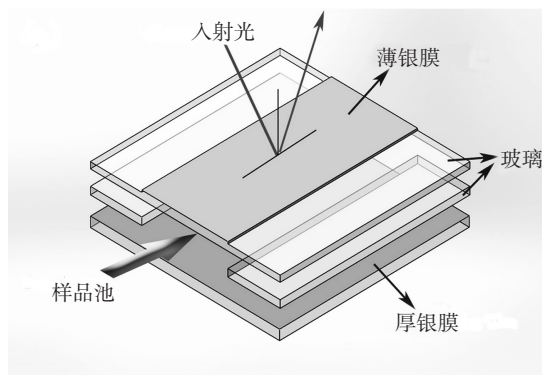
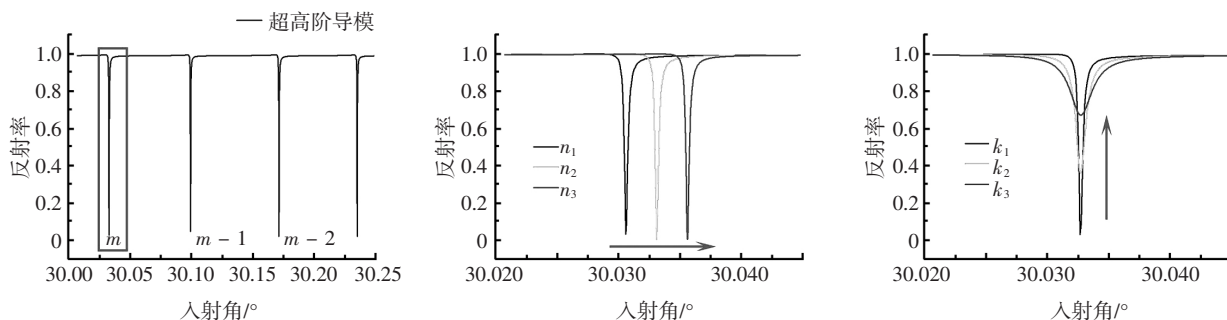


图 1 双面金属包覆光波导结构

超高阶导模是双面金属包覆光波导结构所特有的,其在导波层中呈驻波形振荡场分布,可用自由空间耦合方式来激发。^[10] 这种振荡型的导模具有极高的功率密度,能够与导波层中的样品产生强烈的相互作用,因此导模探针对入射光波长、导波层折射率、消光系数和厚度等参数的灵敏度极高^[11-12]。并且,对于检测的样品本身没有特殊的限制,范围涵盖固、液、气三种状态。



(a) 双面金属包覆光波导中的导模分布 (b) m 阶导模随导波层折射率的变化 (c) m 阶导模随导波层消光系数的变化

图 2 金属包覆波导中超高阶导模的理论分析

为了清晰地说明双面金属包覆光波导传感器检测 CO_2 气体浓度的原理,采用 Fresnel 方程仿真计算出了波导结构中的超高阶导模的分布情况,如图 2(a)所示。计算过程中,入射光波长 $\lambda = 1.572 \mu\text{m}$,金属银、玻璃的介电常数分别为 $\epsilon_{\text{Ag}} = -133.23 + 3.38i$, $\epsilon_{\text{glass}} = 2.251$ 。计算结果表明,超高阶导模共振吸收峰具有极小的半高全宽,故其灵敏度极高。当导波层的折射率 n 和消光系数 κ 发生改变时,超高阶导模也会随之改变。以图 2(a)中的 m 阶导模为研究对象,图 2(b)显示导波层折射率的改变会引起导模的水平漂移,图 2(c)则表明导波层消光系数的改变会导致共振吸收峰的变浅。对于 CO_2 传感器而言,当流过波导腔的 CO_2 浓度发生改变时,导波层的折射率和消光系数一般都会改变,导模的变化将会是图 2(b)和图 2(c)的相互叠加,因此只要检测导模的变化就可以测量 CO_2 的含量。

2 CO_2 气体监测系统的整体设计框架

总体的地铁 CO_2 气体监测系统由传感器节点(由 CO_2 传感器和终端节点组成)、汇聚节点和控制终端三部分组成,整个监测网络的体系结构如图 3 所示。传感器节点的主要工作是实现数据收集、预处理和通讯工作;汇聚节点的主要工作是发起和维护网络,收集汇总传感器节点采集的数据,并上传给到控制终端;控制终端主要负责对上传的数据进行综合处理,若是有 CO_2 含量异常时,控制终端会发出报警,并且通过 LED

显示屏查看各监测点的数据。传感器节点和汇聚节点的数量可根据实际需要合理设置, 确保准确、全面、及时地监测到使用场所的 CO₂ 含量情况。

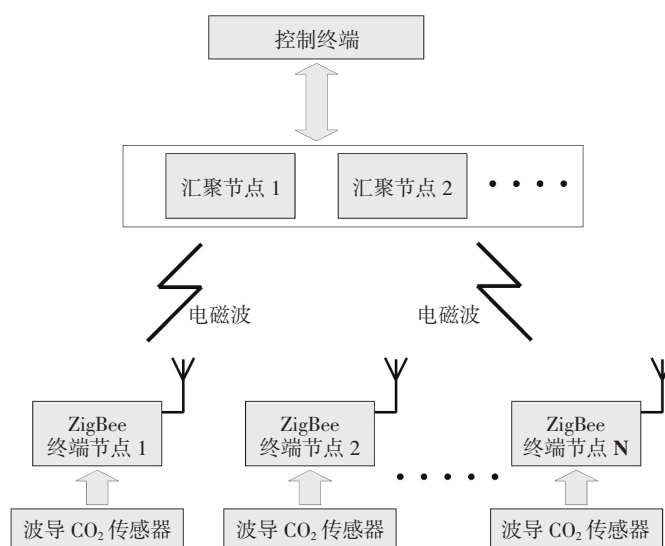
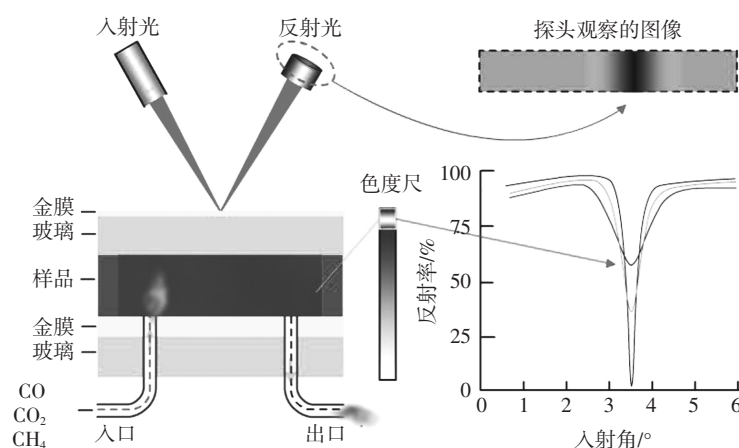


图3 CO₂ 气体监测系统的整体设计框架

2.1 CO₂ 气体监测系统传感器节点的设计

(1) 双面金属包覆光波导 CO₂ 传感器的设计。双面金属包覆光波导的导模激发需要采用衰减全反射光路^[13], 传统的衰减全反射光路要求激光器或波导转动以满足扫描时的角度变化, 这将不利于传感器节点的稳定性和集成, 使用起来也不方便。因此, 本文采用会聚光入射波导表面直接激发导模, 只需要在波长为 1.572 μm 的激光器前部加凸透镜即可, 这样在一定的角度范围内都有入射光, 避免了扫描带来的转动。波导表面反射的光信号经过光电转换模块处理, 再送入微处理器进行数据分析就可获得 CO₂ 的浓度。将入射光源、波导、反射光接收探头、光信号传输接口和光电转换器件集成在一起, 就构成了 CO₂ 气体传感器。图4是金属包覆光波导 CO₂ 气体传感器的示意图。



注: 此图来源于上海交通大学物理与天文学院曹庄琪教授研究团队。

图4 金属包覆光波导 CO₂ 气体传感器示意图

(2) 终端节点的设计。终端传感器节点的稳定性直接决定整个监测网络的可靠性, 整个网络的通信是由众多的传感器节点通过多跳路由方式完成的^[14], 每个传感器节点不但要采集自身所处区域的数据, 同时还作为路由器转发其他节点采集到的数据。终端传感器节点由双面金属包覆光波导 CO₂ 传感器、光电转换模块、

微处理器、无线通信芯片以及电源 5 部分共同构成的,其中微处理器采用支持 IEEE 802.15.4 协议的无线射频单元的 CC2530 芯片,满足以 ZigBee 为基础的 2.4 GHz 波段,对光电转换模块输入的信号进行数据采集与转换,并采用特定报文格式进行数据整理,电源一般选用的是电池,传感器节点设计方案如图 5 所示。

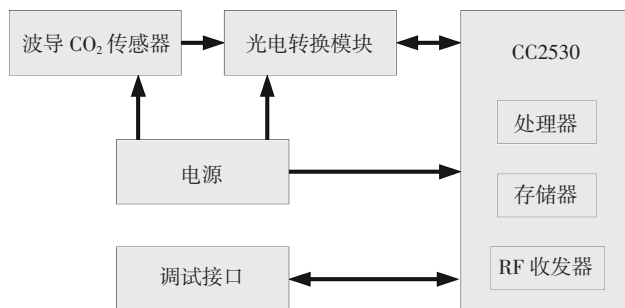


图 5 终端传感器节点的模块化设计

2.2 CO₂ 气体监测系统汇聚节点的设计

汇聚节点相比终端传感器节点,对数据的处理能力、存储能力以及稳定性等方面有更高的要求。它起到汇总并处理传感器节点采集的数据,同时要通过多种方式与传感器节点以及控制终端之间进行通信的功能。在本系统中,微处理器和无线通信模块仍选用 CC2530 芯片,以设计出能满足各种典型需求的通用汇聚节点。由于汇聚节点需要长时间运行,数据传输量大,因此,能量消耗较大,一般采用直流电源和电池相结合的方式供电,汇聚节点设计方案如图 6 所示。

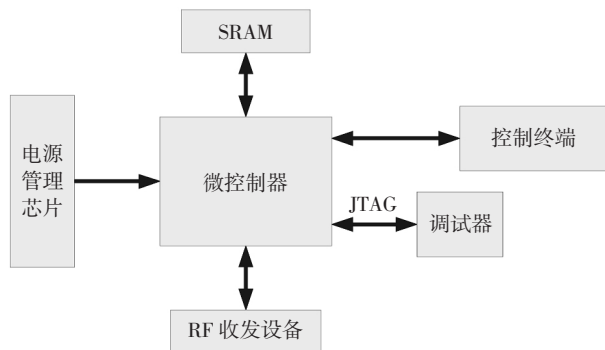


图 6 汇聚节点的设计方案

2.3 CO₂ 气体监测系统控制终端的设计

作为城市轨道交通 CO₂ 气体监测系统的控制终端,对汇聚节点发送来的 CO₂ 监测数据存储处理,工作人员可以通过液晶屏调阅查看各个监测区域的各项数据,起到显示和监测异常报警等功能。控制终端的设计方案如图 7 所示,该系统由主控模块、数据存储模块、CO₂ 含量异常报警模块和电源模块构成,主控模块为 STM32 处理器单元,对整个系统的各项任务进行管理和维护。

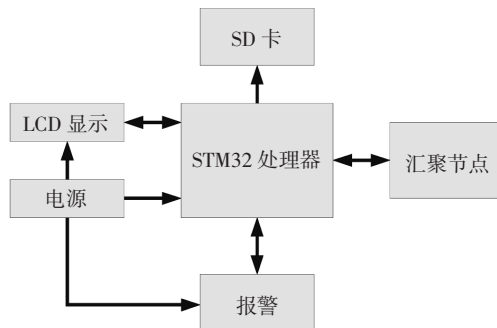


图 7 控制终端设计方案

3 结束语

双面金属包覆光波导中承载的振荡型超高阶导模对导波层的折射率和消光系数具有极高的灵敏度, 以此为载体设计的 CO₂ 气体传感器也具有极高的灵敏度, 模拟计算的结果清晰地解释了该新型传感器测量 CO₂ 的工作原理。同时, 双面金属包覆光波导的应用范围广阔, 只要调整入射光的波长, 就能够测量不同的有害气体。以设计的波导型 CO₂ 传感器为终端, 结合 ZigBee 通信技术设计了城市轨道交通 CO₂ 气体监测系统, 初步的实验结果证明该系统具有较高的稳定性和可靠性, 这将进一步提高城市轨道交通乘客的安全性和舒适度, 改善乘客的出行体验, 促进城市轨道交通有害气体监测技术的发展, 有利于推动“安全、便捷、高效、绿色、经济”的国家交通发展战略目标的实现。

参考文献:

- [1] 中国城市轨道交通协会. 2018 年中国内地城轨交通线路概况[J]. 城市轨道交通, 2019(1): 10–15.
- [2] 吴晓华. 城市轨道交通传感器与检测技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2014: 231–242.
- [3] 张晓武. 城市轨道交通危险气体监测系统的设计要点[J]. 城市轨道交通研究, 2018(S2): 65–66, 69.
- [4] 张宁, 张紫禾, 康磊, 等. 固定排放源 CO₂ 排放检测方法综述[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2016(6): 60–62, 85.
- [5] 侯亚辉. 基于朗伯—比尔定律的食品安全快速检测仪的设计与实现[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- [6] Lu H, Cao Z, Li H, et al. Study of ultrahigh-order modes in a symmetrical metal-cladding optical waveguide [J]. Applied Physics Letters, 2004(20): 4579–4581.
- [7] 曹庄琪. 空芯金属包覆波导传感器特性及应用领域分析[J]. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2016(2): 111–115.
- [8] Xiao P, Wang X, Sun J, et al. Biosensor based on hollow-core metal-cladding waveguide[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012(4): 22–27.
- [9] 魏访. ZigBee 无线通信技术及其应用研究[J]. 通讯世界, 2019(6): 29–30.
- [10] Li H, Cao Z, Lu H, et al. Free-space coupling of a light beam into a symmetrical metal-cladding optical waveguide[J]. Applied Physics Letters, 2003(14): 2757–2759.
- [11] Wang Y, Huang M, Guan X, et al. Determination of trace chromium(VI) using a hollow-core metal-cladding optical waveguide sensor [J]. Optics Express, 2013(25): 31130–31137.
- [12] 管相宇, 黄梅珍, 汪洋, 等. 光波导共振技术结合比色法检测葡萄糖溶液的浓度[J]. 高等学校化学学报, 2013(4): 841–845.
- [13] 朱琨, 邓晓旭, 曹庄琪, 等. 基于 ATR 技术的有机聚合物二次电光系数的测量[J]. 光电工程, 2008(1): 76–79.
- [14] 周雅琴, 谭定忠. 无线传感器网络应用及研究现状[J]. 传感器世界, 2009(5): 35–40.

(责任编辑: 张 利)

Design of CO₂ Gas Monitoring System Used in Metro Based on Double-sided Metal-clad Optical Waveguide Sensor

LU Yan¹, Li Sheng-yong¹, GU Yu-mu², TAO Yu-meng³, SUN Chun-yang³, LI Yong-hao¹

(1. Department of Transport Engineering, Nantong Vocational and Technical Shipping College, Nantong 226010, China;

2. Department of Management Information, Nantong Vocational and Technical Shipping College, Nantong 226010, China;

3. School of Rail Transportation, Nanjing Vocational Institute of Transport Technology, Nanjing 211188, China)

Abstract: The monitoring of harmful gases in metro is very important to passengers' safety. In order to improve the sensitivity of CO₂ content detection in metro, a new type of CO₂ gas sensor with a double-sided metal-clad optical waveguide structure as a carrier is proposed to be a detecting terminal. Through calculation and analysis of the guided mode, the results show that the sensor has extremely high sensitivity. The ZigBee wireless communication technology is used to design metro CO₂ gas monitoring system, and the design scheme is given, which is an alternative scheme for the engineering practice of the harmful gas monitoring system in metro.

Key words: metro; double-sided metal-clad optical waveguide; CO₂ gas sensor; ZigBee; monitoring system