

## In-situ Online Monitoring Method and Instrument Study for Methane Concentration in Offshore Shallow Gas<sup>\* \*</sup>

WU Xiushan<sup>1,2</sup>, TONG Renyuan<sup>3</sup>, Li Qing<sup>3\*</sup>

(1. Key Laboratory for Technology in Rural Water Management of Zhejiang Province, Hangzhou Zhejiang 310018, China;  
2. School of Electrical Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou Zhejiang 310018, China;  
3. National and Local Joint Engineering Laboratory for Disaster Monitoring Technology and Instruments, China Jiliang University, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

**Abstract:** Real-time in-situ online monitoring of offshore shallow gas is very important for the safe of marine construction projects. A real-time in-situ online monitoring method of methane concentration in offshore shallow gas based on thin-film interface detection is proposed and corresponding instrumental research is carried out. The designed offshore shallow gas detection probe realizes the separation of shallow gas and sediment, the detection of methane gas concentration, and the transmission of measurement data to the monitoring data collection node. The signal collection node of the instrument transmits the received measurement data to the receiving circuit of the upper computer, and the upper computer realizes the processing, recording and storage of the measurement data. The simulated sediment test device is built to verify the designed gas probe with a series of different standard concentrations of methane gas, and the relative errors of the measurement results are all within  $-0.1\%$ . The experimental results show that the designed instrument has excellent performance. The actual measurement point is selected to realize onsite realtime measurement, fulfilling the one-time penetration of the gas detection probe into the seabed, and subsequent regionalized and in-situ effective online shallow gas concentration monitoring.

**Key words:** offshore shallow gas; thin film interface; methane detection sensor; realtime monitoring

EEACC: 7230

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2023.01.022

## 近海浅层气甲烷浓度原位在线监测方法与仪器研究<sup>\*</sup>

吴秀山<sup>1,2</sup>, 童仁园<sup>3</sup>, 李青<sup>3\*</sup>

(1. 浙江省农村水利水电资源配置与调控关键技术重点实验室, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江水利水电学院电气工程学院, 浙江 杭州 310018; 3. 中国计量大学, 灾害监测技术与仪器国家地方联合工程实验室, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 近海浅层气实时原位在线监测对海洋建设工程的安全施工至关重要。提出了一种基于薄膜界面检测的近海浅层气甲烷浓度实时原位在线监测方法并进行了仪器研究。设计的近海浅层气检测探头实现了浅层气与沉积物的分离、甲烷气体浓度的检测、测量数据传输至监测数据汇集节点。仪器的信号汇集节点将接收的测量数据无线发射到上位机的接收电路, 上位机实现测量数据的处理、记录和存储。搭建的模拟沉积物试验装置利用一系列不同标准浓度的甲烷气体对所设计的气体探头进行了验证, 测量结果的相对误差均在 $-0.1\%$ 以内, 实验结果表明设计的仪器具有优良的性能。最后选取了实际测量点完成了现场实时测量, 实现了气体检测探头一次贯入海底, 以及区域化、原位和在线浅层气中甲烷浓度的有效监测。

**关键词:** 近海浅层气; 薄膜界面; 甲烷检测传感器; 实时监测

中图分类号: TH702; TH89

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2023)01-0153-06

近海浅层气通常赋存在海底的沉积地层中, 在某些激发条件下, 其状态就会从相对静止变得十分活跃, 会从薄弱的水底地层向上渗出, 直至从海底喷溢出来<sup>[1]</sup>。近海浅层气通常是指在近海岸海床下沉积物中聚积的气体, 主要成分是高浓度的可燃

性甲烷气体, 并含有少量的氮气和二氧化碳等其他气体, 存在形式有层状浅层气、团块状浅层气、高压气囊等。浅层气会不断地改变海底地层的内部沉积物理特性, 降低上覆地层的强度, 当外部作用力出现时, 这些含气的地层就会发生一定的蠕动, 当运移时

项目来源: 浙江省重点研发计划项目(2021C03016); 浙江省农村水利水电资源配置与调控关键技术重点实验室开放基金项目(ZJWEU-RWM-20200402B); 浙江水利水电学院校级科研项目(团队)立项项目

收稿日期: 2022-02-15 修改日期: 2022-05-10

间较长或者是赋存气量很大时,就可能导致地层下陷,更有甚者发生井喷,这会直接破坏海上建筑物地基结构,对海洋工程带来严重危害<sup>[2]</sup>。另一方面海底浅层气还会导致火灾、海损等其他方面的潜在危害。因此对海底浅层气隐患点进行有效的评估,自动、及时、长期和原位地获取浅层气中甲烷浓度,依此进一步地分析和获得地层中气体变化情况,实现区域化监测,是保障海洋工程安全建设和减少浅层气潜在灾害发生的重要环节之一<sup>[3]</sup>。

目前国内外学者对浅层气的监测开展了一系列的技术研究和仪器设计,提出了多种监测方法,主要有:勘探钻孔法<sup>[4]</sup>、声学法<sup>[5]</sup>、光学监测法<sup>[6]</sup>、半导体气敏法<sup>[7]</sup>与基于薄膜界面探测技术的监测法<sup>[8]</sup>等。勘探钻孔法无法对浅层气进行原位、实时、及时的监测,自动化程度低,施工复杂,而且每进行一次测量所需成本高;声学法只能通过间接的特征来判断浅层气是否存在,无法进行定量的分析,一般可用于前期对浅层气的初步判断;光学监测法具有较高的灵敏度,但是重现性却较差;半导体气敏法监测环境中需要稳定的氧气含量,对近海浅层气中甲烷浓度的检测受到了一定的限制;基于薄膜界面探测技术的监测方法是利用现代材料科学的聚合技术所产生的分子渗透膜,在海底分压的作用下将海底沉积地层中的浅层气分离到一个密封的检测室,然后再利用其他方法对分离出来的气体进行检测,该方法可以原位、实时实现海底沉积层中浅层气的监测,但是该仪器现在均为国外进口,价格昂贵,维修成本高。

本文基于薄膜界面探测技术提出了一种近海浅层气中甲烷浓度实时原位在线监测方法并进行了仪器研究,设计了一种新颖的浅层气分离、采集的气体探头,分别采用固液分离和气液分离实现浅层气的气体采集,并设计了气体探测器对浅层气中的甲烷气体进行测量;通过建立模拟实验平台,采用标准甲烷气体对设计的气体探头进行检验,并分别对实验的结果和误差进行了分析;为进一步检验提出的监测方法和所设计仪器的实用性,进行了现场选址测试,并针对测试结果做出了相关分析,实现了气体检测探头一次贯入海底、浅层气中甲烷浓度区域化和原位在线有效监测。

## 1 系统设计

系统的总体方案如图 1 所示,设计气体探头来实现浅层气中甲烷浓度的检测,将气体探头利用液压装置和连接杆直接贯入海底沉积地层中,采用固液分离和气液分离实现浅层气的气体采集,利用气

体探头内部的气体探测器和检测节点电路测量浅层气中甲烷浓度,然后利用连接杆中的信号传输线将测得的数据传至数据汇集节点;数据汇集节点将接收到的测量数据以无线方式发送给母船或者岸基上的监测终端,监测终端的上位机对接收的测量数据进行实时处理、存储并显示<sup>[9-10]</sup>。

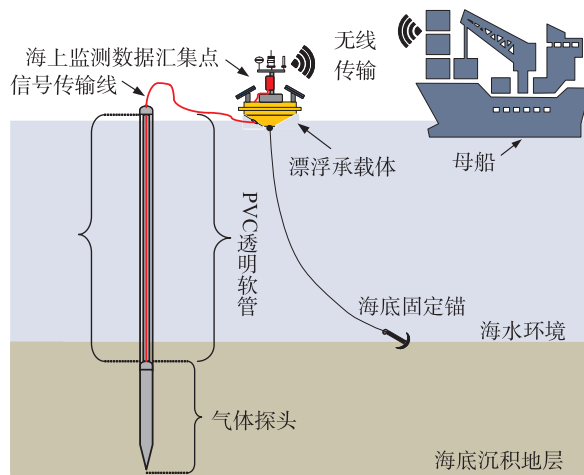


图 1 系统总体设计方案示意图

在系统总体方案中,气体探头是实现整个监测过程的关键部件之一,气体探头设计结构如图 2 所示,主要由下端透水石、转接头、气体分离室、气体检测室、密封头等组成,其中渗透膜安装紧固于气体分离室,气体探测器和检测节点放置于气体检测室内。

气体探头通过下端透水石和气体分离室实现了浅层气从沉积地层和海水中的分离出来;然后再由气体检测室实现浅层气中甲烷浓度的实时性检测;然后通过信号传输线将检测得到的甲烷浓度实时传输给监测数据汇集节点。为实现浅层气的分离,所用到的渗透膜需安装在气体探头内部,并将分离分为两步进行,首先利用下端透水石进行固液的分离,从沉积地层中得到含有浅层气的海水,然后再进行气液的分离,把浅层气从海水中分离出来,而分离出来的浅层

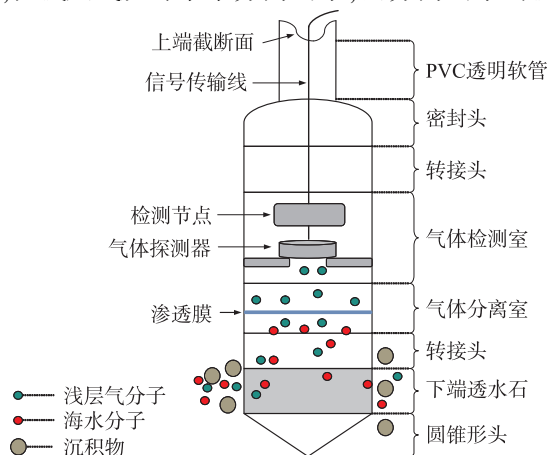


图 2 气体探头结构示意图

气直接由选取的气体探测器在气体探头内部进行浓度的检测。最终实现的气体探头如图 3 所示。

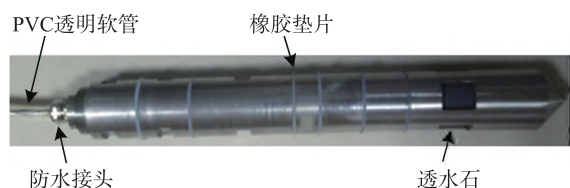


图 3 气体探头实物图

## 2 膜体的选择

在气体探头设计中,为了有效地分离出浅层气分子,选择合适的渗透膜是关键步骤之一。考虑到监测仪器所处的海底环境和为保证监测仪器内部气体探测器、检测节点等电路的正常工作,要求设计中所使用的膜体具有超强的疏水性能,同时对水分具有超低的浸润性,膜体的防水性是保证监测仪器正常工作的首要前提。其次,由于海底沉积地层中存在海水分压作用,当海水通过气体探头的透水石进入内部接触到膜体时,膜体就需要承受海水的分压作用,这就要求膜体具有一定的机械强度,且材料组成质地均匀,使得膜体表面具有一致的机械强度,能够承受均匀分布探头内部压力。同时,膜体也要有良好的气体通量,能够分离出进入探头内部海水中的浅层气<sup>[11]</sup>。

根据以上分析和要求,设计中采用经过激光刻蚀和 SiO<sub>2</sub> 掺杂后的聚二甲基硅氧烷新型高分子材料所制成的复合膜体。经过激光刻蚀以后的膜体在其表面产生了微米-亚微米-纳米的复合多级结构,激光刻蚀使得膜体具有了超强的疏水性, SiO<sub>2</sub> 的掺杂则使膜体的机械强度得到了加强。掺杂后形成的复合膜体是由致密分离层和支撑层两部分组成,致密分离层主要起到分离作用,一般较薄。设计中采用从广东东莞蒲微防水透气膜有限公司定制的膜体,其具体尺寸为:孔径为 0.02 μm、厚度为 0.09 mm、防水等级为 IP67、透气量为 300~600 ml/cm<sup>2</sup>/min@ 7 kPa、耐温范围为-40 ℃~120 ℃<sup>[12]</sup>。

## 3 系统设计及模拟实验

本监测仪器利用气体探头在海底对分离的浅层气进行实时性监测,检测节点气体传感器需要具有良好的稳定性和适用性,能够独立快速完成检测,无需依赖其他物质参与检测;同时能够对不同浓度的甲烷进行检测,因此具有宽范围的检出能力,使得装置可以适用于不同监测区域。非色散红外(NDIR)型甲烷气体传感器对不同浓度的标准甲烷气体检测

都有比较稳定的模拟电压输出,且输出幅值变化较为显著<sup>[13-15]</sup>。所以,在本设计中采用郑州炜盛科技的基于 NDIR 原理的 MH-742B 红外气体传感器,该型气体探测器的主要参数为:量程为 0~100% Vol、分辨率为 0.01% Vol、输出信号直流电压为 0.4 V~2.0 V、吸收波长为 3.31 μm。该气体传感器灵敏度与分辨率高、功耗低、响应时间快、具有温度补偿而且体积小,非常适合在探头内部检测的体积要求。在实验室中对采用的传感器进行了不同浓度的标定实验,测量了在 1%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90% 等不同浓度的标准甲烷下的模拟输出电压,取多次测量的平均值作为最终输出结果,得到的传感器工作特性如图 4 所示。从图中得出的多项式类型的拟合优度较高,多项式类型的曲线在拟合数据之间的分布也是比较均匀的。

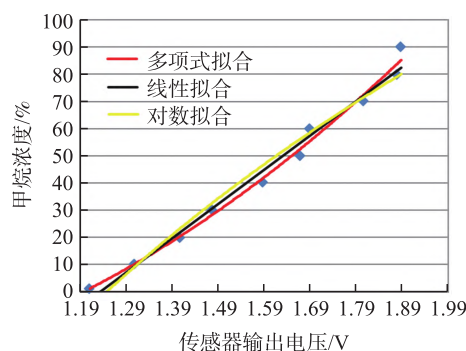


图 4 传感器工作特性曲线

检测节点的硬件电路完成的功能有:读取气体传感器输出电压信号,并转换为气体浓度值;将转换后的气体浓度值通过信号传输线上传给监测数据汇集点。根据以上功能需求,检测节点的硬件电路设计具体包括检测节点处理器电路、电源电路、气体传感器测量信号电路与数据无线传输电路等<sup>[16]</sup>。在系统的机械结构、硬件电路、信号通讯和显示等各模块完成之后,最终实现的监测仪器如图 5 所示,由气体检测探头、监测数据汇集节点与 PC 上位机三部分组成。监测数据汇集节点的硬件电路主要包括:

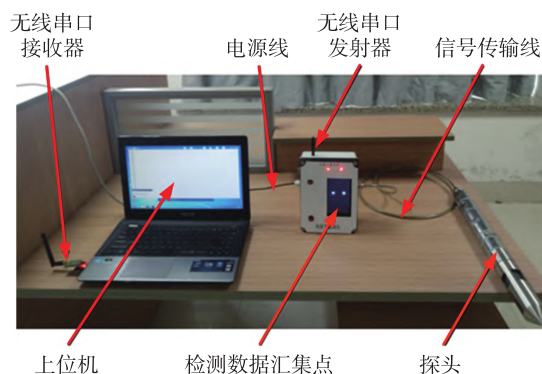


图 5 监测仪器实物图

汇集节点处理器电路、串口数据接收电路、数据存储电路、数据无线发射电路、LCD 显示电路及电源电路等。上位机软件主要是用于母船或者是岸基的 PC 端实时显示,使监测数据结果能够在远程实时显示。其显示功能分为实时数据显示和实时曲线显示。监测人员可以通过预设阈值使上位机软件对接受的数据进行异常数据的排查,如果出现数据的异常,上位机就会发出警报信号。

为验证所设计的监测仪器与设计方案的可行性,也为仪器的实际应用打下有力的基础,搭建了模拟沉积物实验平台,该平台如图 6 所示,由模拟沉积物装置、标准浓度甲烷气瓶、监测仪器组成。模拟沉积物装置为塑料圆柱形桶状,内部中空,分为上下两层,下层底部密封,上层上端带有可拆卸密封盖,并在密封盖中间开有一个比气体探头外周稍大的开口,主要是用于气体探头插入装置桶内。模拟沉积物装置上下两层的中间设有隔板,在隔板上开有连接口,一方面当气体探头插入沉积物以后可以通过中间隔板上的连接口对探头下端进行一下固定,另一方面分为上下层可以使其更加接近于海底沉积层,在设计中甲烷的注入是从下层开始注入,这样注入的甲烷气体就会慢慢向上运移,近似地模拟出沉积物中浅层气的真实情况。用于注入甲烷气体的三个注入口均匀分布在装置的外周壁,这样就可以使注入的甲烷气体能够较为均匀地向沉积物中扩散,为保证装置内部甲烷气体混合充分,在每个甲烷气瓶上都安装了气体流量阀,注入气体时气体的流速控制得尽量小,并使气体注入的时间尽量长,使甲烷气体在泥中缓慢地渗透,从而使泥中充分混入甲烷气体。检测仪器的测量结果如表 1 所示,测量值和气体实际浓度值误差很小,基本吻合,从而验证了设计的气体探头在模拟沉积物甲烷测量中表现出了优良的性能。



图 6 模拟沉积物甲烷测量实验平台

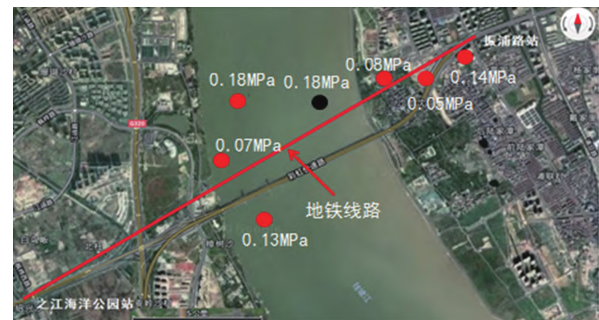
表 1 模拟沉积物甲烷测量实验

标准气体浓度/%	测量结果/%	相对误差/%
1	0.91	-0.09
10	9.93	-0.07
20	19.92	-0.08
30	29.91	-0.09
40	39.95	-0.05
50	49.94	-0.06
60	59.92	-0.08
70	69.92	-0.08
80	79.94	-0.06
90	89.92	-0.08

## 4 现场测试及结果

### 4.1 现场测试选址及测量

为了更进一步验证测量装置和测量方法的有效性,选取了杭州段钱塘江上在建的杭港地铁 6 号线的建设路段,经地质勘探发现建设路段的过江隧道周边存有大量浅层气富集点,具体现场测量点如图 7 所示。



● 现已探明的浅层气藏点 ● 本次测试点

图 7 杭州钱塘江 6 号地铁过江段浅层气富集分布及测试点选取图

选取的可疑浅层气富集测试点位于距离岸基约 1.5 km,水深约 8 m,测试时有微弱风浪,无潮汐,水面较为平静。首先是将本设计的气体探头与内部带有中空通道的连接杆相连接,将 PVC 透明软管和其内部的信号传输线通过连接杆的中空通道引出,然后由静力触探钻机将其压入江底,之后再接入另一个连接杆,再由静力触探钻机压入,以此类推,逐步地把气体探头向江底压入。而在做这些操作之前,为了有效地避免连接杆在压入江底以后受到江底下面水流的冲击,而致使连接杆发生歪斜,导致压入过程中的断裂,会事先将一个较长的套筒压入江底。而以上的压入都是在这个套筒的内部进行的,即气体探头和连接杆的压入都是在套筒的内部,相当于对气体探头和连接杆增加了保护。图 8 所示为现场测试情况和总体测试方案,气体探头位于最下端,之

后是连接杆,通过多节连接杆,再由静力触探机将其缓慢地压入江底沉积物中,信号传输线由 PVC 透明软管进行保护,防止过度的拉扯使其被扯断,然后再由连接杆内部的中空通道引出。引出的信号传输线连接到汇集节点,汇集节点实时地接收来自气体探头的测量数据,然后汇集节点将测量数据无线发射,PC 端的信号接受器实时接受汇集节点的无线数据,上位机实时读取接受的数据进行处理、记录及存储。



(a) 气体探头压入江底沉积物的现场测试图



(b) 现场测量方案图

图 8 现场测试操作图与测试方案

#### 4.2 现场测量结果及分析

在现场测量过程中,当气体探头开始接触到江底的沉积物时再开始进行数据的采集、记录和存储,直到整个测试实验完毕,即气体探头从沉积物中拔出为止,现场测量实验数据如图 9 所示。由图中可

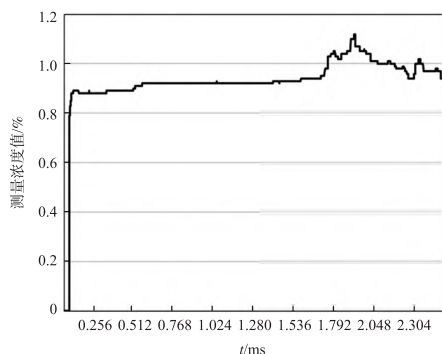


图 9 现场监测结果

以看出:探头在打入沉积物后中气体探测器的输出浓度值一直保持稳定,在江面下 16 m,沉积物大约深 8 m 处,测量数据明显增大,且伴有扰动。

## 5 结论

海底沉积物中浅层气的原位、实时监测对确保海洋工程建设的安全非常重要,可以使人们能够对浅层气灾害防患于未然。本文在基于薄膜界面探测技术上,设计了一种近海浅层气中甲烷浓度原位在线监测仪器,完成了气体浓度检测节点、数据汇集节点、无线发射接收电路、上位机的设计。文章提出了一种新颖的浅层气监测气体探头设计,实现了浅层气的分离与甲烷气体的稳定、宽范围测量,使监测仪器有了广泛的适用环境;搭建的模拟沉积物试验平台利用一系列不同标准浓度的甲烷气体对所设计的气体探头进行了验证,测量结果表明设计的仪器具有优良的性能,并选取了实际测量点完成了现场实时测量,实现了气体检测探头一次贯入海底、浅层气中甲烷浓度区域化和原位在线有效监测,对我国在浅层气监测方面提供了一种有效解决方案,能够极大地减轻勘探钻孔所带来的繁琐施工。

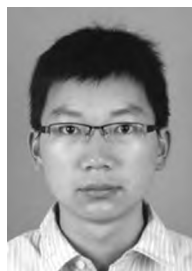
## 参考文献:

- [1] 周其坤,孙永福,宋玉鹏,等. 渤海湾某海洋平台场址浅层气分布与成因[J]. 地质通报,2021,40(2):298-304.
- [2] 孙春岩,王栋琳,张仕强,等. 深海甲烷电化学原位长期监测技术及其在海洋环境调查和天然气水合物勘探中的意义[J]. 物探与化探,2019,43(1):1-16.
- [3] 申正伟. 深海溶解甲烷原位长期探测技术研发及应用研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2018.
- [4] 薛洪来,温哲. 煤矿隐伏小断层的瓦斯抽采钻孔探测方法[J]. 煤田地质与勘探,2021,49(3):69-77.
- [5] 杨肖迪,马瑞民,罗小桥,等. 海底浅层气探测识别方法研究[J]. 海岸工程,2020,39(3):187-195.
- [6] 邓科,武晓蕊,李佳,等. 基于光学效应的变压器油中甲烷气体光声光谱检测技术[J]. 电工技术,2020(2):42-44.
- [7] 李名伟,朱庆辉,夏晓蒙,等. 基于多传感器人工嗅觉系统的土壤有机质含量检测方法[J]. 农业机械学报,2021,52(10):109-119.
- [8] 苗成省,李青,贾生尧,等. 基于薄膜界面探测的近海浅层气中甲烷浓度检测[J]. 传感技术学报,2018,31(11):1662-1668.
- [9] Yacovitch T I, Daube C, Herndon S C. Methane Emissions from Offshore Oil and Gas Platforms in the Gulf of Mexico [J]. Environmental Science And Technology, 2020, 54

- (6):3530-3538.
- [10] 顾晓亮,林东杰,魏杰,等. 聚二甲基硅氧烷/聚醚酰亚胺平板复合膜分离 CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> 的研究[J]. 北京化工大学学报:自然科学版,2011,38(4):32-36.
- [11] 郭岩宝,刘承诚,王德国,等. 甲烷传感器气敏材料的研究现状与进展[J]. 科学通报,2019,64(14):1456-1470.
- [12] 丁恩杰,马洪宇. 微纳甲烷传感技术的研究[J]. 工矿自动化,2016,42(3):16-20.
- [13] 郑文雪,郑传涛,姚丹,等. 一种中红外带间级联激光甲烷传感器的研制[J]. 光学学报,2018,38(3):166-171.
- [14] 温新竹,秦少平,郭堃. 红外甲烷气体检测传感器的研究[J]. 化学工程与装备,2015(1):31-32,35.
- [15] Mounasamy V, Mani G K, Ponnusamy D, et al. Cadmium Metavanadate Mixed Oxide Nanorods for the Chemiresistive Detection of Methane Molecules[J]. New Journal of Chemistry, 2020, 44: 12473-12485.
- [16] 梁光清. 基于激光甲烷检测技术的危险源气体监控终端的设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(1): 108-111.



吴秀山(1974—),男,浙江水利水电学院教授,硕士生导师,主要从事检测技术及自动化装置的教学科研工作, wuxs@zjweu.edu.cn;



童仁园(1984—),男,中国计量大学副教授,博士,硕士生导师,主要从事传感检测技术及自动化装置的教学科研工作, tongrenyuan@126.com;



李青(1955—),男,通讯作者,中国计量大学教授,博士生导师,主要科研方向为动态测量与控制、传感技术, lq13306532957@163.com。