

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106851

# 基于多阵元光离子化传感的泄漏监测系统研究\*

景金荣 范正吉 洪应平

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

**摘要:** 针对传统检测方法无法适用特定空间狭小、难以精确定位应用场景的研究现状,结合乙二醇冷却液挥发性并可被紫外灯电离的特点,研制了基于光离子化的紫外传感器,提出了阵列传感方法,通过在易泄漏部位营造密闭空间,将多阵元传感器放入密闭空间检测,搭配后端的数据处理模块与上位机模块,构建了冷却液泄漏阵列检测平台。在模拟泄漏测试环境中取得了良好的测试效果。试验结果表明,该系统突破了狭小空间冷却液渗漏实时在线监测关键技术,整个系统对微小泄漏的反应灵敏,在用0.1 mL乙二醇冷却液模拟微泄漏试验中,设置报警浓度为3 mg/L后,报警时间保持在10 s以内,反应及时,处理快速,可扩展性强,为复杂的冷却环境下及时排除冷却液故障提供实用化检测手段。

**关键词:** 紫外灯;微小泄漏;液体管道泄漏;乙二醇冷却液;光离子化;阵列测量

**中图分类号:** TN919.34 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

## Monitoring system based on multi-array photoionization sensing

Jing Jinrong Fan Zhengji Hong Yingping

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the traditional detection methods are limited to be unable to achieve accurate positioning function in the specific situation of narrow space, combined with the characteristics of ethylene glycol coolant volatilization and ionization by ultraviolet lamps, a sensor based on photoionization is fabricated, an array sensing method is proposed, by creating a closed space in the prone part of leakage, and placing multiple array sensors in the closed space for detection, the array detection platform for coolant leakage was constructed by combining the data processing module and PC. The test results show that the system has broken through the key technology of real-time online monitoring of coolant leakage in narrow space, and the whole system is sensitive to small leakage. In the simulated micro-leakage test with 0.1 mL ethylene glycol coolant, the alarm time is kept within 10 s after the alarm concentration is set to 3 mg/L, and the response is timely and the system is strong scalability, which provides a practical detection method for timely troubleshooting coolant faults in complex cooling environment.

**Keywords:** UV lamp; tiny leakage; liquid pipeline leakage; ethylene glycol coolant; photoionization; array measurement

## 0 引 言

有害物质的泄漏会对舰载雷达、机载雷达、弹道导弹防御雷达电子设备造成短路等故障导致无法完成任务<sup>[1-3]</sup>。监测有害物质的泄漏是有源相控阵雷达的重要任务,T/R组件阵列作为有源相控阵雷达的核心部分,体积小,热流密度大,通常采用液冷方式<sup>[4-5]</sup>降温,效果显著但容易出现泄漏情况<sup>[6]</sup>。泄漏依据泄漏强度大小,一般分为渗漏、泄漏和泄放3种,根据时间的变化强度逐渐加强。为了避免泄漏

过多对其他电子设备造成的损害,需要在渗漏初期阶段检测到并采取措施,这就是泄漏预测的出发点。目前,负压波检测法<sup>[7]</sup>、感应线缆法<sup>[8]</sup>以及气体探测法<sup>[9]</sup>被广泛应用于液体管道泄漏监测。然而,负压波检测法无法实现实时监控;感应线缆法在狭小空间铺设困难;气体探测法因其操作简便,是未来检漏技术的发展趋势。气体探测法中,红外传感器、化学传感器和紫外传感器被广泛用于监测有害蒸汽的泄漏。红外传感器对有机蒸汽的检测存在困难;化学传感器浓度分辨率低,无法实现高精度检测<sup>[10]</sup>;基于光离子

收稿日期:2021-06-03

\* 基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(51705475)项目资助

化原理<sup>[11]</sup>的紫外气体传感器对检测的气体或蒸汽在正常工作环境下,几乎可以实时作出反应,连续测量,不但没有破坏性,而且灵敏度超过大多数常用传感器,对有机气体或蒸汽的检测甚至可达  $\mu\text{g}/\text{L}$  级,因此适用的范围广泛。

对于整个回读系统而言,虽然最新趋势是无线传感<sup>[12-14]</sup>。这种网络在节点部署方面变得灵活,但狭小空间中无线传输易受干扰且彼此靠近的位置不能保证可靠的链路,有线网络相对于无线网络来说更为可靠,可在实时监控的情况下避免虚报和漏报。对于雷达这样的精密电子设备,泄漏一点都会对设备造成巨大损失,所以本次设计采用稳定可靠的有线传输网络<sup>[15]</sup>。

本文介绍了用于狭小环境中乙二醇冷却液蒸汽检测的单阵元紫外传感器的研究和数据处理系统开发的试验结果。这项工作的主要任务是设计单阵元传感器以及数据处理传输平台设计,不同的单阵元传感器放置于潜在泄漏源处(阀门、电子设备)附近,当传感器监测到泄漏蒸汽时,通过数据处理传输平台将数据实时显示。下面将具体介绍这两部分的工作。

## 1 系统设计

### 1.1 单阵元传感器设计

单阵元传感器的设计是基于光离子化原理。离子化指利用高能量的离子化源迫使待测气体分离成带电粒子的过程。待测气体化合键断裂所需的最小能量称为电离电位(IP)。二者的单位均为电子伏特(eV)。因此,设计时需要知道被测气体的 IP 以及所需要的紫外灯的能量。当灯源能量小于待测气体 IP 时,待测气体无法离子化;当灯源能量大于或等于待测气体 IP 时,气体或蒸汽分子吸收光子而被离子化为呈游离状态的离子,离子通过电离室时,吸附于电极片上从而形成可被检测到的微弱电流。由于光离子化不具备破坏性,离开电离室时,离子重新复合为分子,原理如图 1 所示。

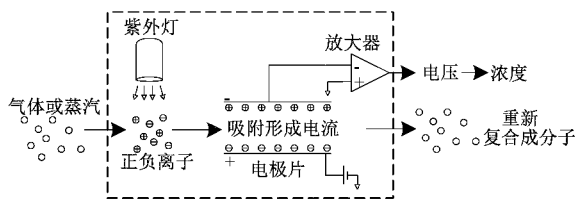


图 1 光离子化原理

单阵元传感器包括如下主要模块:电离室结构、紫外灯发射源、紫外灯驱动电路以及处理和通信单元。传感器电源模块采用 MAX660 转换芯片,生成的一 5 V 用来给 I/V 转换电路模块集成放大器供电,直流升压电路选用 TI 公司的 TPS55330,生成的 24 V 为短光程电极供电,采用 RS-485 输出,为拓展多阵元模式提供了便利。在本节中,重点介绍单阵元传感器的主要模块。

因电离室结构的大小对传感器的性能与体积影响较

大,本文对电离室结构进行了设计。常见的结构有长光程和短光程两种,长光程结构如图 2(a)所示,因其所占空间大且对偏置电压要求高无法适应小型化要求而舍弃,本次自主研发的传感器采用短光程结构,如图 2(b)所示,一方面偏置电压大大降低且满足体积小要求,另一方面长时间使用可减少气体分子对灯表面的污染而使传感器灵敏度降低的现象。

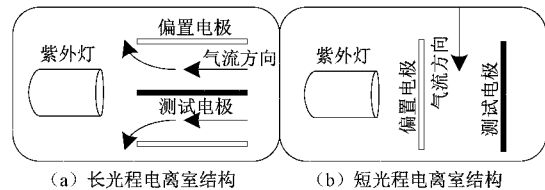


图 2 电离室结构

目前,市面上的紫外灯 IP 有 9.8、10.6 以及 11.7 eV 3 种。IP 越高,检测范围越广,但 11.7 eV 的紫外灯寿命较低,而 10.6 eV 相对于 9.8 eV 的紫外灯检测范围更广泛,所以本次设计的发光源选用的是德国贺利氏公司生产的直径 6 mm,高 14 mm 的 10.6 eV 交流型紫外灯。电路设计时,选用高频变压器来为紫外灯提供激励源,用以生成峰值为 600 V,频率为 100 kHz 的交流电来驱动紫外灯。为减小高频变压器带来的噪声干扰,选择在功放电路中串入磁珠 FB,紫外灯驱动模块设计如图 3(a)所示。

I/V 转换电路模块作为整个单阵元传感器的核心部分,作用是将电离产生的微小电流经放大转换为可测的电压,电路设计时,第 1 级放大电路采用 T 型电阻网络作为反馈电阻来减小阻容带来的误差,第 2 级滤波电路滤去了电路中的交流成分减小噪声对输出电压的影响,再经第 3 级稳压电路将电压输出。I/V 转换电路模块电路如图 3(b)所示。

处理和通信模块负责将可测的电压信号经 AD 采样,处理转化为可输出的 485 信号。微控制器选用的是 altera 公司的 max10 系列中的 10M08SAM153 芯片,该芯片内部自带 flash 并带有 ADC IP core,可满足对模拟量的采样,再经 485 转换芯片 MAX3485ESA 将电压信号转化为 485 信号通过 485 端口输出给 485 电缆,设计如图 3(c)所示。

### 1.2 平台设计

如图 4 所示,由 1.1 小节所示的单阵元传感器组建 16 路多阵元构建分布式模块,分布式模块将多阵元数据以数据帧格式发送给数据处理模块,数据帧中不同的主机号编码用以区分不同阵元回传的数据。数据处理模块对数据帧解析将数据段中的电压信号处理转化为浓度信号,再传给上位机模块。上位机的用户交互模块解析上位机输出的指令;数据交互以及预警设置,可视化模块可选择实时显示不同阵元的数据。

数据处理模块采用自上而下的设计方法,以阵元传感器工作触发信号作为定时基准。PC 向 FPGA 发送控制命

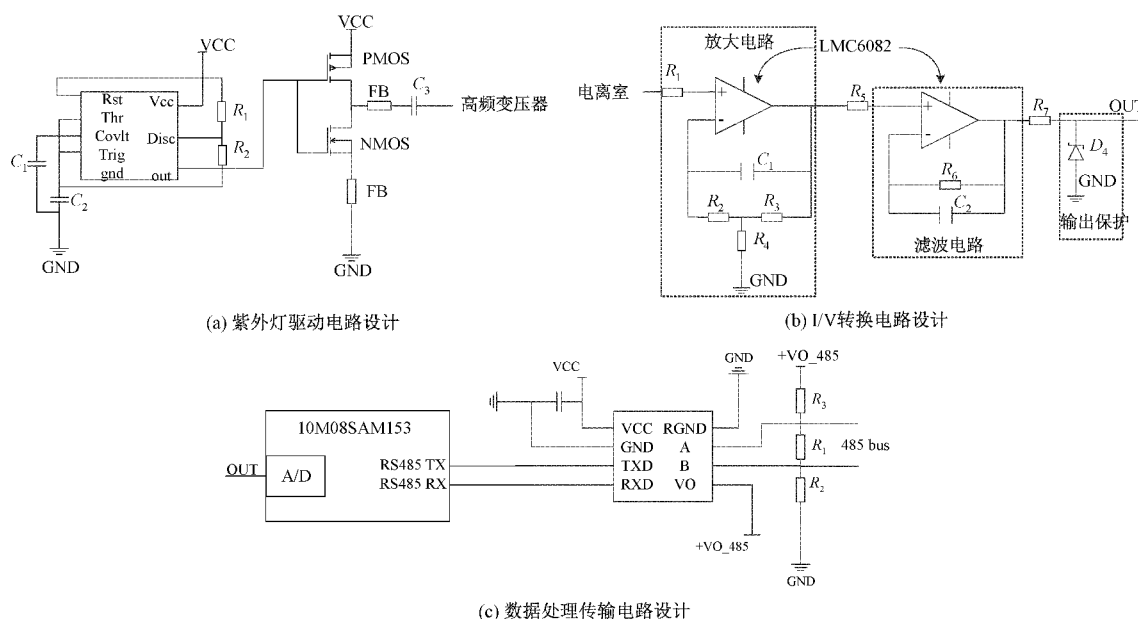


图3 阵元传感器的主要模块设计

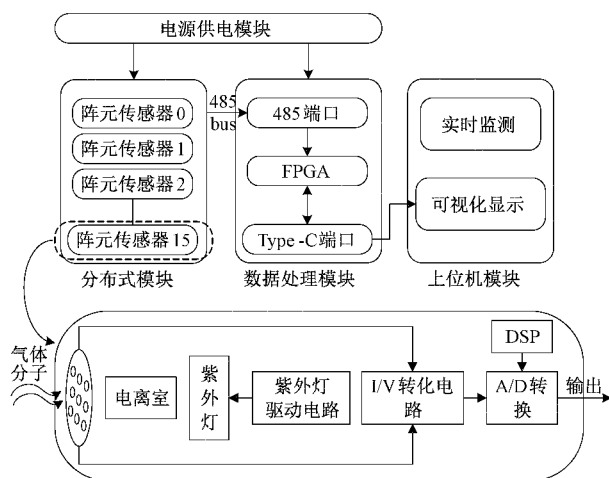


图4 平台设计

令后,FPGA 接收命令并分析需要控制的阵元,然后采集浓度数据,传输到 PC 显示。

数据处理模块传输单元采用 485 传输的主要原因是 485 总线具有很好的扩展性,总线上最多可挂 256 个测试设备,所以设计时采用 IS01176 T 是差分的收发器,它是由含隔离性能的驱动器和收发器组成而成的,其中的 VO 引脚是总线驱动器是否启用状态输出管脚,该管脚的作用是便于改变总线上的数据进行传送的方向。该电路完成了信号源隔离,可以使差分总线进行最高的效率和受到最低程度的电或磁干扰的传输。根据阻抗匹配要求,在主节点的总线的开头处和总线的末尾处分别增添了 1 只 120 Ω 的匹配电阻,最大程度上免除了总线传输时发生的信号的反射,增强总线故障安全能力,保证总线数据传输的正确性。

详细工作流程为:单阵元传感器上电后通过基准信号

发送到 FPGA 管脚采样端,FPGA 接收该电信号作为开始时刻,开始数据采集。在数据采集过程中,按照 FPGA 中固定帧格式打包。用户打开数据传输指令后,FPGA 将收集到的数据发送到 PC 进行解码计算。FPGA 按照主机号寻址方式循环读取不同阵元结果,同时启动定时器 T0,等待通信结束,当 FPGA 成功的接收到指定 PID 的应答信息后,便会置位该标志,完成通讯。按此方法轮询所有阵元,FPGA 将采集到的数据上传给 PC,又从 1 号开始下一循环的寻址。

## 2 测试环境搭建及试验

### 2.1 测量依据

由于乙二醇冷却液常温为液态,标定时无法量化。试验前,需先将阵元传感器用标准异丁烯气体进行校准,校准之后的传感器不仅可以测试空气中的有机气体总量(TVOC)之外,在已知特定气体后,同样适用。响应系数 RF 与紫外灯的电子伏有关,查阅相关资料,10.6 eV 的紫外灯对乙二醇分子的 RF 为 15.7,再通过转换关系可直接使得校准后的传感器通过计算得到该气体的浓度,校正系数为校正气体(通常为异丁烯,校准系数为 1)的灵敏度与待测气体灵敏度的比值,定义如式(1)所示。

$$RF = \frac{R_{IBE}C_Y}{C_{IBE}R_V} \quad (1)$$

式中:RF 为待测气体的校准系数; $C_{IBE}$  为校准异丁烯浓度; $R_{IBE}$  为异丁烯校准后读数; $C_Y$  为待测气体浓度; $R_V$  为对待测气体读数。

### 2.2 阵元传感器标定

#### 1) 零点标定

为使零点标定更为准确,使用周围空气对传感器进行

零点标定,该方法将空气中的微量其他气体和微量水蒸气的因素考虑进去,相比于用瓶装氮气瓶标定具有较好的实践意义。具体操作为在清新的空气中,固定好传感器位置上电,进行零点标定。表 1 为各阵元传感器的零点标定值(仅显示试验中用到的传感器的值)。

表 1 传感器零点标定 V

编号	第 1 次 测量值	第 2 次 测量值	第 3 次 测量值	平均值
3	0.290 2	0.317 5	0.344 2	0.317 3
8	0.239 5	0.249 6	0.245 6	0.244 9
11	0.246 0	0.251 6	0.305 3	0.267 6
12	0.253 0	0.255 1	0.284 6	0.264 2
13	0.251 9	0.242 9	0.257 5	0.250 8
14	0.228 5	0.235 4	0.273 7	0.245 9
15	0.236 8	0.237 5	0.290 0	0.254 8

2)灵敏度标定

该传感器设计的目的是检测乙二醇冷却液微小泄漏,所以标定时多选用为  $\mu\text{g/L}$  级别的异丁烯标气进行标定。试验时选用 100、200、500 和 1 000  $\mu\text{g/L}$  的标准异丁烯气体,每个阵元传感器在标准异丁烯气体下进行 7 次测量,表 2 记录的测量值为测量 7 次求平均的结果。标定平台如图 5 所示。

表 2 传感器灵敏度标定

编号	100 $\mu\text{g/L}$ 环境	200 $\mu\text{g/L}$ 环境	500 $\mu\text{g/L}$ 环境	1 000 $\mu\text{g/L}$ 环境
3	0.327 5	0.339 6	0.371 4	0.426 0
8	0.255 8	0.266 2	0.297 4	0.358 5
11	0.276 1	0.286 8	0.317 9	0.380 3
12	0.277 6	0.289 9	0.313 0	0.376 6
13	0.262 9	0.270 1	0.306 6	0.363 8
14	0.256 9	0.266 3	0.300 8	0.358 3
15	0.265 0	0.283 4	0.310 9	0.364 5

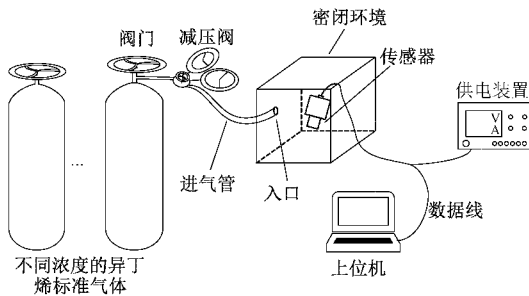


图 5 标定平台

2.3 测 试

为检测多路传感器对同一泄漏点的反应,构建测试环

境如图 6 所示。将 11、12、13、14 以及 15 号 PID 按图 6(a)的顺序依次从左到右的顺序插入同一个气室中,连接好所有线并上电,首先在无泄漏环境中进行零点标定,用 1 mL 注射器向气室滴入 0.1 mL 的冷却液,模拟冷却液的微量泄漏状态,泄漏气体浓度实时变化如图 7 所示,当气体扩散时,5 个 PID 均可以快速作出反应,13 号传感器离泄漏点最近,所以最先检测到泄漏,上升幅度最大,12、14 号次之,11、15 号最低。

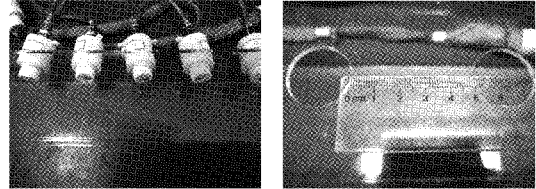


图 6 单点泄漏模拟测试环境

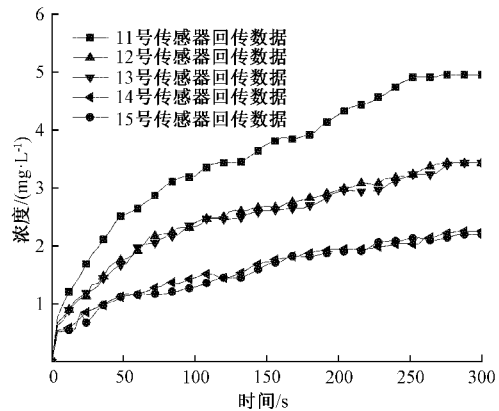
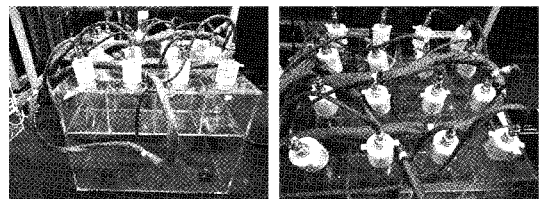


图 7 实时波形图

为实现分布式传感,搭建了如图 8 所示的多点泄漏测试环境来实现  $4 \times 4$  阵列化分布,使用冷却液泄漏模拟平台进行泄漏模拟,将 16 路阵元传感器分别置于气室中,先零点标定,其次设置警报,最后通过泄漏模拟装置(气室,气室大小为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ )的预留注射口用注射器向 3、8、13 号阵元传感器气室中滴入 0.1 mL 乙二醇冷却液模拟冷却液的微量泄漏,通过冷却液泄漏监测平台对 16 路阵元传感器进行实时监测,并将得到的扩散气体浓度进行可视化处理得到如图 9 所示结果。



(a) 多点泄漏测试环境 (b) 顶部示意图

图 8 多点泄漏模拟测试环境



图9 多点泄漏模拟测试结果

### 3 结 论

本文利用冷却液蒸发的分子可被紫外灯离子化的原理,从液体微泄漏导致的问题出发,提出了基于自研光离子化传感器的示警检测法,并构建了数字解调系统以及泄漏监测平台,对系统进行了验证,本文研制的系统具有灵敏度高、可分布式测量的优点,此外,该系统采用485电缆,还具有很好的扩展性,对更多的泄漏关键部位进行监测,为实现快速及时排除防冻液泄漏故障提供实用化检测手段。

#### 参考文献

- [1] 彭敏,马宁,王少军,等.基于可见光图像的工业过程气体泄漏检测研究[J].电子测量与仪器学报,2019,33(6):1-8.
- [2] 郭颖,杨理践,郎究明.基于故障诊断观测器的管道多点泄漏研究[J].仪器仪表学报,2020,41(5):261-268.
- [3] 刘浩,谭亮,程晶晶.一种基于物联网技术的管道漏失检测电路设计[J].国外电子测量技术,2020,39(5):94-98.
- [4] 谭光韬,张文文,王磊.气体传感器阵列混合气体检测算法研究[J].电子测量与仪器学报,2020,34(7):95-102.
- [5] ANH D D, KIM D, KIM S, et al. Determination of flood-inducing rainfall and runoff for highly urbanized area based on high-resolution radar-gauge composite rainfall data and flooded area GIS data[J]. Journal of Hydrology, 2020:124704.
- [6] JI H P, YE J A, YOO K H, et al. Leak flow prediction during loss of coolant accidents using deep fuzzy neural networks[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2021(53):2547-2555.
- [7] DIAO X, JIANG J, LEI N, et al. Leak detection and

location in liquid pipelines by analyzing the first transient pressure wave with unsteady friction[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 60:303-310.

- [8] XU Y, WANG T, GAO S, et al. Pipeline leak detection using Raman distributed fiber sensor with dynamic threshold identification method[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(14):7870-7877.
- [9] 王冲.甲类废液罐区气体探测系统设计[J].辽宁化工,2020,49(6):690-692.
- [10] ZHOU Z, SOHN H. A novel chemical gas vapor sensor based on photoluminescence enhancement of rugate porous silicon filters[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(9):2722.
- [11] 王晋,郝现伟,董钧港,等.高精度光离子化传感器的设计[J].红外与激光工程,2020,49(8):248-255.
- [12] 刘强.基于后向散射和软件定义的无线传感器网络通信[J].电子测量与仪器学报,2020,34(6):41-47.
- [13] 张铮,曹守启,朱建平,等.面向实时监测的无线传感网低功耗通信策略[J].仪器仪表学报,2019,40(2):257-264.
- [14] 华枝发,张兰,岳显昌,等.高频地波雷达无线数据传输系统设计[J].电子测量与仪器学报,2021,35(1):151-158.
- [15] 张帅.基于多模式通讯的有缆无缆混合交叉站关键技术研究[D].长春:吉林大学,2020.

#### 作者简介

景金荣,硕士研究生,主要研究方向为冷却液泄漏测试技术研究。

E-mail:jjr701xj@163.com

洪应平,讲师,主要研究方向为极端环境下测试技术及仪器研究。

E-mail:hongyingping@nuc.edu.cn