

基于NDIR检测原理的CAN总线制冷剂泄漏监测系统

张佳亮^{1,2}, 曾德龙¹, 卿宗胜^{1,2}, 陆运章^{1,3}, 周 蒙^{1,3}, 李 静^{1,3}

¹中国电子科技集团公司第四十八研究所, 湖南 长沙

²高性能智能传感器及检测系统湖南省重点实验室, 湖南 长沙

³中国-埃及可再生能源“一带一路”联合实验室, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年8月2日; 录用日期: 2026年8月31日; 发布日期: 2026年9月14日

摘 要

为了对两相流冷却系统的多个监测点进行制冷剂浓度实时在线监测, 研究设计了一种基于NDIR检测原理的CAN总线制冷剂泄漏监测系统。该系统主要由多台制冷剂浓度传感器和一台泄漏监测采集器构成。其中, 传感器以GD32单片机为核心, 基于NDIR原理控制R134a气体传感器模块完成数据采集, 并通过CAN总线发送至采集器; 采集器则负责接收各传感器数据, 并进一步上传至上位机。由于CAN总线数据传输稳定且抗干扰能力强, 系统不仅具备良好的扩展性, 还能便捷地增设监测点。实验表明, 该系统可对雷达冷却系统中R134a制冷剂的泄漏进行快速监测与报警, 满足实际应用需求。

关键词

NDIR, CAN总线, R134a浓度, 在线监测系统

CAN Bus Refrigerant Leakage Monitoring System Based on NDIR Detection Principle

Jialiang Zhang^{1,2}, Delong Zeng¹, Zongsheng Qing^{1,2}, Yunzhang Lu^{1,3}, Meng Zhou^{1,3}, Jing Li^{1,3}

¹The 48th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Changsha Hunan

²Hunan Provincial Key Laboratory of High-Performance Intelligent Sensors and Detection Systems, Changsha Hunan

³China-Egypt Renewable Energy “Belt and Road” Joint Laboratory, Changsha Hunan

Received: August 2, 2026; accepted: August 31, 2026; published: September 14, 2026

Abstract

In order to conduct real-time online monitoring of the refrigerant concentration data at multiple

文章引用: 张佳亮, 曾德龙, 卿宗胜, 陆运章, 周蒙, 李静. 基于 NDIR 检测原理的 CAN 总线制冷剂泄漏监测系统[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(5): 840-850. DOI: 10.12677/jsta.2026.145081

monitoring points of the two-phase flow cooling system, a CAN bus refrigerant leakage monitoring system based on the NDIR detection principle is designed. This system consists of multiple refrigerant concentration sensors and one refrigerant leakage monitoring collector. The sensor is based on the NDIR detection principle and uses the GD32 single-chip microcomputer to control the R134a gas sensor module and collect concentration data. The data is transmitted to the collector through the CAN bus. The collector is responsible for receiving data from each sensor and uploading the data to the upper computer via CAN bus. The system offers good scalability, allowing monitoring points to be added conveniently, while the CAN bus ensures stable data transmission and strong anti-interference capability. Experiments show that the system can rapidly monitor and alarm the leakage of R134a used in the radar cooling system, meeting the application requirements.

Keywords

NDIR, CAN Bus, Concentration of R134a, Online Monitoring System

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

随着雷达、数据中心及机载电子设备等大型高热流密度设备的广泛应用，对冷却系统的性能提出了更高要求。此类设备通常采用两相流冷却系统散热，R134a 是其中常用的换热介质。在设备运行过程中，为确保冷却系统正常工作，须对 R134a 泄漏情况进行连续、实时监测。因此，R134a 实时在线监测技术的研究与应用日趋重要。鉴于大型高热流密度电子设备配套的两相流冷却系统具有布局范围广、管路节点多的特点，R134a 泄漏监测往往涉及多个监测点位，需实现多点同步检测。在此背景下，如何对系统多点 R134a 浓度进行长期、稳定、可靠的实时监测，并确保数据传输与管理的有效性，具有重要的研究价值。

近年来，国内外对于氟利昂制冷系统中 R134a 制冷剂泄漏监测的研究逐渐增多。吴永忠等[1]采用红外吸收检测法，对中小型空调及汽车空调中的 R134a 制冷剂进行了检测。结果表明，该方法能够实现 R134a 浓度的快速监测。郭军等[2]基于 RS-485 总线对制冷剂泄漏进行检测报警，结果表明该总线可满足制冷剂泄漏检测报警系统的个性化应用。Nentronics 公司证实采用分散红外线技术(NDIR)能快速检测 R12、R134a 和其他碳氢化合物等制冷剂的浓度[3]。

Table 1. Comparison of refrigerant sensor technology approaches
表 1. 制冷剂传感器技术路线对比

对比项目	电化学制冷剂传感器	半导体 MOS 气敏传感器	NDIR 非色散红外传感器
适用冷媒	传统含卤冷媒 (R22/R134a/R410A)	全品类冷媒，广谱响应	全品类冷媒，可单一型号精准定制
通信输出方式	模拟电压/电流、简易 TTL 电平；极少自带总线	模拟 0~5V、PWM、TTL 串口；中高端模组带 RS485	TTL/UART、4~20mA、RS485 Modbus 主流工业总线
测量精度	±8%~±15%，低浓度稳定性一般	±10%~±20%，温湿度漂移大	±3%~±5%，工业级精度高
选择性 (抗交叉干扰)	中等，酒精、氨气会轻微干扰	极差，油烟、水汽、乙醇等误触发，易误报	极强，几乎不受普通杂气干扰

续表

T90 响应时间	3~10 s	5~30 s	3~20 s
使用寿命	2~3 年	3~5 年	10~15 年
可扩展性	差, 无法多气体兼容	一般, 无法精准切换多冷媒	极强, 更换滤光片可切换冷媒
成本	中底	底	偏高

如表 1 所示, 结合制冷剂传感器技术路线比对, 本文设计了基于 NDIR 检测原理的 CAN 总线制冷剂泄漏监测系统。通过 CAN 总线采集制冷剂浓度数据, 采用 CAN 总线与上位机进行数据交互, 可以对多点制冷剂浓度数据进行实时可靠监测与管理。

2. 系统总体设计方案

2.1. 工作原理

传感器使用光学原理, 基于非分散性红外技术(Non-Dispersive InfraRed, NDIR)进行非接触式测量, 以红外原理为基础, 通过检测气体的独特吸收光谱, 从而做出精确的定量分析计算出其浓度值。由红外光谱系统特性可知, NDIR 服从 Lambert-Beer 定律气体吸收理论, 该定律分析了红外光的吸收与物质浓度的关系[4]:

$$I = I_0 \exp(-K_\lambda LC) \quad (1)$$

式中: I 为被物质吸收后的透射光强度; I_0 为入射光的强度; K_λ 为待测气体在波长 λ 处的吸收系数; C 为待测气体的浓度; L 为待测气体吸收路径长度。当气体吸收系数 K_λ 、光学长度 L 和入射光强 I_0 确定时, 由式(1)可得出:

$$C = \frac{1}{K_\lambda L} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2)$$

如图 1 所示, 红外光源 LED1 发出的红外辐射经分束器后, 一路经过一定浓度、一定长度待测气体吸收之后, 得到与气体浓度成正比的光谱强度 I , 光谱强度 I 通过信号测量和调理得到气体浓度信息, 另一路作为参考信号, 用来排除温度和压强等干扰因素的影响。

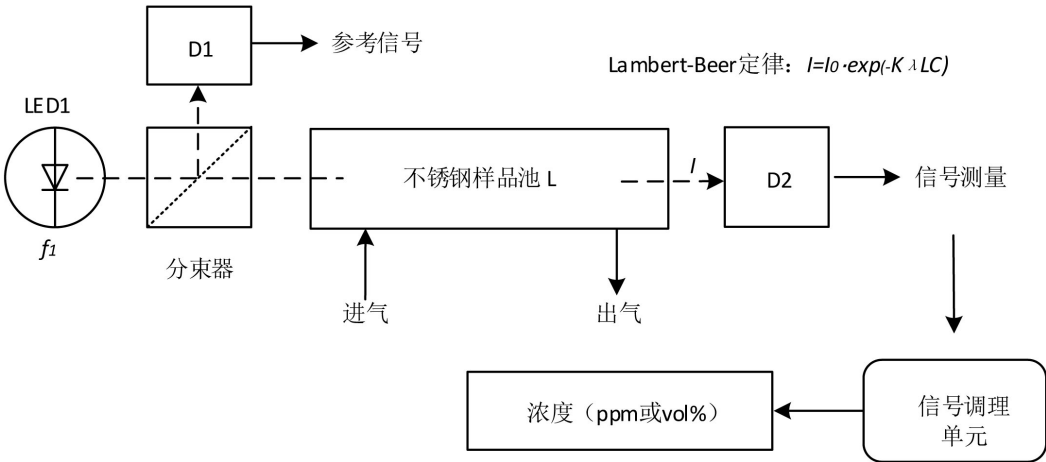


Figure 1. Principle block diagram
图 1. 原理框图

2.2. 总体方案

系统的组成如图 2 所示,主要由 n 个传感器和 1 台采集器组成。传感器主要由 GD32 微控制器(MCU)、R134a 气体传感器模块、CAN 隔离通信模块和供电单元等组成。采集器主要由 GD32 微控制器(MCU)、CAN 隔离通信模块、CAN 通信模块、供电单元和报警单元等组成。传感器采集的 R134a 浓度信号转换处理后输出 CAN 数字信号,传感器和采集器之间的数据通过 CAN 总线传输,R134a 浓度超过告警阈值,报警单元输出报警信号,采集器通过 CAN 接口将数据传输至上位机。采集器由外部 220VAC 供电,经供电单元转换后给多个传感器提供 24VDC 电压[5]。

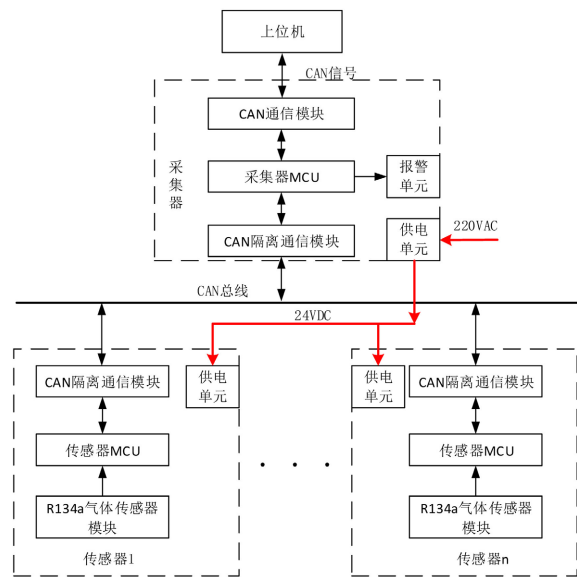


Figure 2. Overall design system block diagram
图 2. 总体设计系统框图

3. 硬件电路设计

3.1. 传感器硬件电路

传感器总体架构主要包含四个部分:处理器单元(MCU)、光源驱动、光路与气室、信号检测模块,如图 3 所示。其中,光路与气室部分包括红外光源、光路、气体吸收室、温度压力传感器和光电探测器;信号检测模块包括前置放大电路和滤波放大电路。

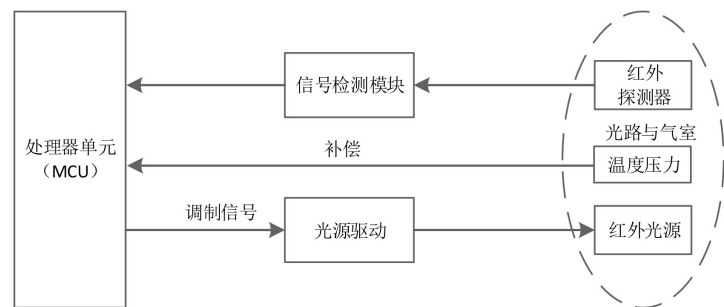


Figure 3. Sensor overall architecture
图 3. 传感器总体架构

1) 处理器单元

处理器单元 MCU 采用兆易创新的 GD32F405RGT6。MCU 利用内部 ADC 采集携带浓度信息的电压信号，并在内部实现信号解调和浓度计算，再经 CAN 接口输出数字信号。如图 4 所示，处理器单元电路部分主要包括晶振电路、滤波电容、通信、采集、控制接口等。

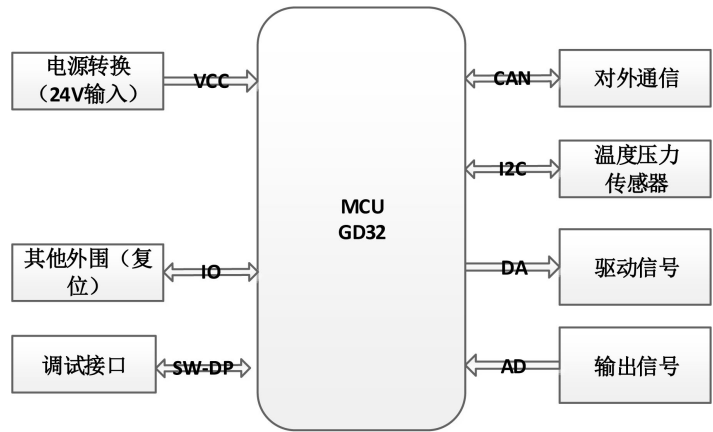


Figure 4. Hardware block diagram
图 4. 硬件框图

2) 红外光源与驱动电路

红外光源选用苏州思南传感的 SNIRS-32 型产品，其辐射波长覆盖 2~20 μm 。该器件基于先进微结构制造技术的硅芯片制备，核心由支撑在热绝缘与电绝缘膜上的薄膜电阻器构成。其热效应遵循焦耳定律，具备毫秒级的加热与冷却响应速度，从而实现了红外光发射的快速直接调制。

在 NDIR 系统中，红外光源由电脉冲来驱动，为使光源稳定地辐射红外光，需要使光源的工作电压和工作电流保持恒定。MCU 产生频率为 3 Hz，占空比为 50% 的 PWM 信号，作为红外光源的电调制信号。MCU 通过内部定时器 3 Hz 的 PWM 信号，经信号叠加、V/I 转换产生光源驱动信号，实现光源的驱动。驱动电路的结构框图如图 5 所示。



Figure 5. Light source drive circuit block diagram
图 5. 光源驱动电路框图

3) 探测器与信号检测

探测器选用淄博新颖传感器有限公司的 PYD-G11-DL-5218 型热释电红外探测器，内部结构如图 6 所示，其包含两个探测元件 A、B，探测器 A 测量 R134a 气体，探测器 B 参比信号输出。为抑制探测器由于自身温度变化而产生的误差，分别在探测元件后跨接温度补偿热电元件，消除温度的影响。两探测元件分别并联一个门电阻，将探测器由热释电效应产生的电荷信号转变为可供后端电路读取的电压信号[6]。

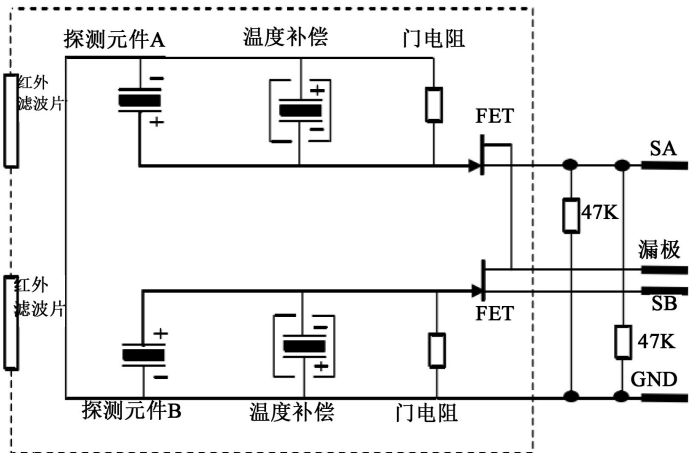


Figure 6. Internal structure diagram of the detector
图 6. 探测器内部结构图

红外光源发出的光经气体吸收后到达光探测器，探测器将携带 R134a 浓度信息的光信号转换为微弱电压信号，利用高精度仪表放大电路将电压信号放大，经带通滤波得到待解调电压信号，电压信号通过 MCU 的 ADC 采集。信号检测与处理电路框图如图 7 所示。

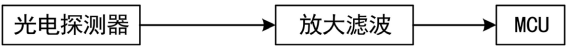


Figure 7. Block diagram of signal detection and processing circuit
图 7. 信号检测与处理电路框图

4) 温压采集电路

NDIR 技术基于气体分子的红外吸收光谱原理，气体分子内部的旋转、振动等状态受环境温度和压强影响会发生变化，因此测量环境中温度和压强的变化会使气体吸收线产生漂移，进而影响气体浓度的检测。

利用 MS5803 型数字压力传感器测量环境中温度和压力变化。该芯片压力测量范围为 0~110 kPa (绝压)，压力误差为 ± 0.5 kPa，温度测量范围为 -40°C ~ 85°C ，温度误差为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。温压测量电路见图 8。

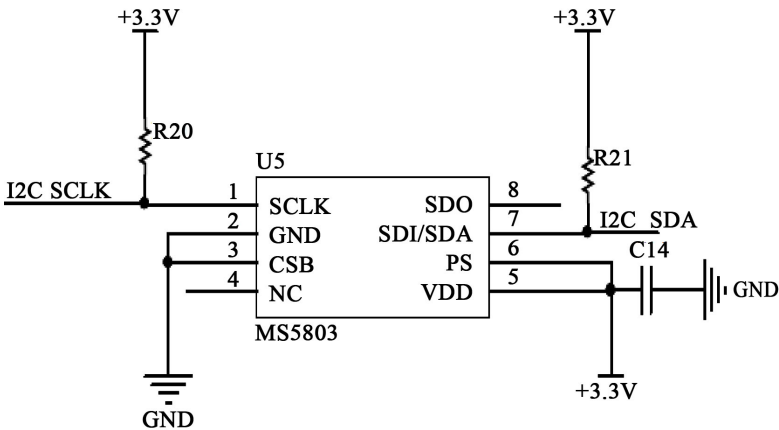


Figure 8. Temperature and pressure measurement circuit
图 8. 温压测量电路

3.2. 采集器硬件电路

采集器包含电源电路、MCU、声光报警器电路、2 路 CAN 通信电路。原理设计框图如图 9 所示。

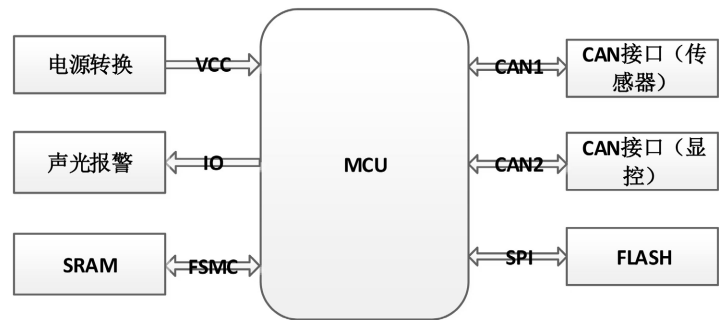


Figure 9. Principle design block diagram of the collector
图 9. 采集器原理设计框图

采集器通过 CAN1 通信电路接收监测传感器发送的采集信号，并可对监测传感器进行自检测和配置。采集器通过 CAN2 总线将数据传送给上位机。

电源电路将 220VAC 转成 24VDC，对传感器供电，并通过 DC/DC 电源转换为各功能电路供电。MCU 采用高性能低功耗的 ARM 处理器，具备串口、CAN、GPIO、SPI 等外设。声电报警器电路由 MCU 进行数据处理分析，经驱动电路后，可在 R134a 浓度异常情况下根据用户设置阈值进行声光报警。

4. 软件设计

4.1. 传感器软件设计

传感器主程序流程如图 10 所示：

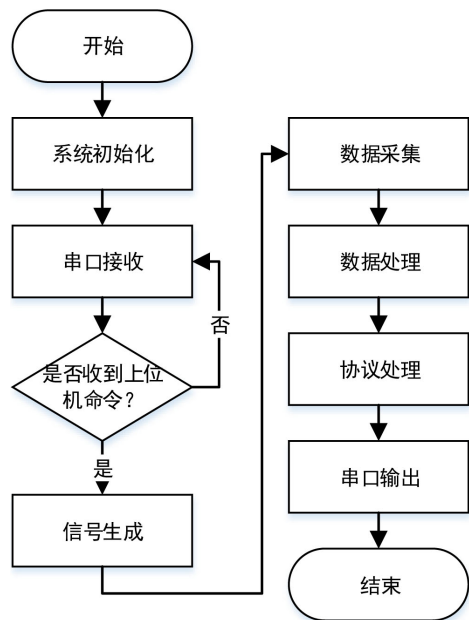


Figure 10. Flowchart of the main program for the sensor
图 10. 传感器主程序流程图

系统流程具体如下：

- a) 系统初始化：包括系统时钟、串口、定时器、DMA、DAC、ADC、模拟 IIC 和看门狗等初始化；
- b) 信号生成：通过微控制器内部定时器和 DMA 模块输出 PWM 信号驱动红外光源；
- c) 数据采集：包括 ADC 采集和模拟 IIC 采集两部分，其中，以微控制器内置的 ADC 作为模数转换器，定数据点数采样输出的吸收信号，模拟 IIC 采集电压和温度值；
- d) 数据处理：通过锁相、异常点剔除、平均、补偿等算法对采集的数据进行处理，生成浓度、压力、温度数据；
- e) 协议处理：根据通信协议，生成包含浓度、压力、温度、是否超限、是否故障等信息的报文；
- f) 串口输出：串口输出数据。

4.2. 采集器软件设计

采集器软件运行于主控制器 GD32F407ZGT6 之上，主要实现对 CAN 总线、串口等外设接口的操作，完成传感器数据采集、数据发送及设备状态检测等功能。此外，软件集成了看门狗机制，可在程序运行异常时自动复位恢复。其功能框图如图 11 所示。

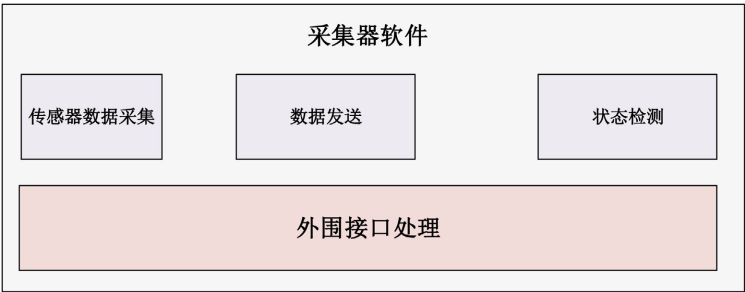


Figure 11. Functional block diagram of the collector software
图 11. 采集器软件功能框图

采集器软件功能如表 2 所示：

Table 2. List of functions of collector software
表 2. 采集器软件功能列表

序号	名称	功能	备注
1	接口模块	1. CAN、串口等接口数据读写 2. 对上位机发送的指令解析 3. 接口状态检测	
2	传感器数据采集	1. 获取通道和数据类型信息 2. 读取传感器数据	
3	数据发送	数据发送给上位机	
4	状态检测	1. 检测模块的工作状态 2. 检测传输接口状态	

4.3. 通信设计

在本系统中，传感器与采集器以及采集器和上位机之间通过 CAN 自定义的方式通信，采集器通过设

置一个特定的多播 ID (0x00000021)定时向传感器 CAN 总线发送查询命令广播帧，总线上的多个传感器节点同时接收并响应指令。CAN 通信配置信息为：波特率，125 Kbps；帧类型，扩展帧；数据域长度，8 字节；查询命令广播帧 ID，0x00000021。采集器发送的数据及传感器回复的数据如表 3 所示。

Table 3. CAN bus sends and replies data
表 3. CAN 总线发送和回复数据

	Byte0	Byte1	Byte2	Byte3	Byte4	Byte5	Byte6	Byte7
上位机发送值	0x01	0x01	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00
传感器回复值	0x81	0x0000		0x00	0x00	0x0000		0x00

上位机发送值为固定值，传感器的回复值中，Byte1 和 Byte2 表示浓度；Byte3 表示浓度分辨率；Byte4 表示单位，包括%、PPM 和 PPB 等 3 个等级；Byte5 和 Byte6 表示温度，分辨率为 1℃；Byte7 表示状态，包含光路故障、预热状态和传感器故障等状态信息。

采集器通过透传的方式将传感器的数据通过 CAN 总线发送给上位机。

5. 系统测试

根据上述设计，研制出传感器和采集器，并使用 5 个传感器和 1 台采集器搭建组成 1 套制冷剂泄漏监测系统。传感器的常温和高低温测试结果如表 4~6 所示，常温下传感器测量精度小于 3% FS；-40℃低温以及 55℃的高温下，传感器测量精度可达 5% FS。

Table 4. Test data at room temperature (20℃)
表 4. 常温(20℃)测试数据

产品编号	0 ppm	500 ppm	1000 ppm	2000 ppm	精度(FS%)
1	10	517	1016	2041	2.05
2	15	461	953	1970	2.35
3	11	521	1030	2051	2.55
4	13	527	1028	2043	2.15
5	14	517	994	2032	1.6

Table 5. Low-temperature (-40℃) test data
表 5. 低温(-40℃)测试数据

产品编号	0 ppm	500 ppm	1000 ppm	2000 ppm	精度(FS%)
1	21	516	1038	1969	1.9
2	17	464	984	1957	2.15
3	11	605	1098	2098	4.9
4	-9	586	1047	2048	4.3
5	30	590	1059	1996	4.5

Table 6. High-temperature (55℃) test data
表 6. 高温(55℃)测试数据

产品编号	0 ppm	500 ppm	1000 ppm	2000 ppm	精度(FS%)
1	17	539	1012	2029	1.95
2	-11	446	913	1906	4.7
3	-8	544	1053	2085	4.25
4	-7	552	1049	2070	3.5
5	23	514	1006	2034	1.7

制冷剂泄漏监测系统由 5 个传感器和 1 台采集器组成，系统实物如图 12 所示。上位机的 CAN 调试工具按照 CAN 通信配置信息设置，发送扩展帧，广播帧 ID 为 0x00000021，发送数据(HEX)为 01 01 00 00 00 00 00 00，采集器通过透传的方式将传感器的数据发送给上位机，上位机接收到的部分传感器数据如下所示：

ID	数据
0x000D000B	81 00 00 00 02 00 1A 02;
0x000D000D	81 00 00 00 02 00 19 02;
0x000D0010	81 00 00 00 02 00 15 02;
.....	

系统准确采集到 5 个传感器的数据，符合设计预期。



Figure 12. Test system
图 12. 测试系统

6. 结束语

本系统基于 NDIR 检测原理，通过 CAN 总线进行组网，实现了对多个监测点制冷剂浓度的实时监测。系统具有很高的容错率，单个传感器的故障不会影响其他传感器及整个系统的正常工作。得益于组

网简单、可靠性高和抗干扰能力强等优点,该系统自投入使用以来一直保持稳定运行,为数据中心的冷却系统提供了可靠保障。未来,该系统在雷达、机载电子设备以及大型冷库等涉及制冷剂生产、储存与使用的场景中,具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 吴永忠, 陈浩. 基于 ADuC842 的制冷剂气体检测仪设计[J]. 电子设计工程, 2016, 24(12): 64-66.
- [2] 郭军. 基于 RS-485 总线的数据采集控制技术在可燃性制冷剂泄漏检测报警系统中的应用[J]. 日用电器, 2014(5): 66-68.
- [3] Neutronics INC (2006) ULTIMA ID™ Refrigerant Identifier User's Instruction Manual.
<http://www.manualslib.com/manual/1218284/Neutronics-Ultimaid.html>
- [4] 吴永忠, 唐正. 一种制冷剂鉴别仪的设计与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2013(12): 21-23.
- [5] 邓德源, 王成栋, 苗强. 基于 CAN 总线的温湿度在线监测系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2012(12): 40-42, 60.
- [6] 陈浩. NDIR 气体检测技术及其在 R134a 中应用的研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.