

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106384

基于 STM32 的光纤侧向耦合漏液监测系统设计^{*}

张峰 崔永俊 侯钰龙

(中北大学 仪器与电子学院 仪器科学与动态测试教育部重点实验室 电子测试技术国防科技重点实验室 太原 030051)

摘要: 针对存在电磁干扰等特殊环境下的漏液监测的需求,设计了一种基于 STM32 的光纤侧向耦合漏液监测系统。系统主要分为硬件模块和上位机模块。系统硬件包含光纤传感器模块和信号变换器模块,光纤传感模块由带缺陷结构的 POF 光纤、LED 灯带以及传感封装外壳构成;信号变换器模块采用 STM32 为主控芯片,实现弱光信号的采集放大和传输功能。系统上位机采用滤波算法实现对漏液信号的均差比较,滤除偶发脉冲,降低误报率和系统响应时间,提升传感带的灵敏度。系统采用多条传感带级联安装,经实验表明,系统能够稳定工作,每个传感点能够实现单点标定,漏液监测范围可达 8 m,漏检和误检率在 2% 以内。

关键词: 光纤侧向耦合;系统设计;漏液监测;滤波算法

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

Design of optical fiber lateral coupling leakage monitoring system based on STM32

Zhang Feng Cui Yongjun Hou Yulong

(Key Laboratory of National Defense Science and Technology on Electronic Measurement, Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to meet the needs of leakage monitoring in special environment such as electromagnetic interference, this paper designs an optical fiber lateral coupling leakage monitoring system based on STM32. The system is mainly divided into hardware module and upper computer module. The system hardware consists of optical fiber sensor module and signal converter module. The optical fiber sensor module is composed of POF fiber with defect structure, LED light strip and sensor package shell. STM32 is used as the main control chip in the signal converter module to realize the function of weak light signal acquisition, amplification and transmission. The upper computer of the system uses the filtering algorithm to realize the mean difference comparison of the leakage signal, filter out the occasional pulse, reduce the false alarm rate and system response time, and improve the sensitivity of the sensing band. The experimental results show that the system can work stably, each sensor point can achieve a single point calibration, the leakage monitoring range can reach 8 m, and the leakage and false detection rate is less than 2%.

Keywords: optical fiber lateral coupling; system design; leakage monitoring; filtering algorithm

0 引言

随着科技的发展,漏液监测不在是某一行业的专利,漏液监测系统在大型数据中心、半导体厂房、智能家居、传输管道、无人潜航器和载人潜航器等都有着广泛的应用^[1,2]。

目前液漏检测仪器设备在石油化工、供水、及其他工业生产领域内被广泛使用,但是陆上测试手段向水下设备等特殊环境内部移植时,普遍会遇到一些问题,目前应用做多

的漏液监测模块是采用大面积漏液传感器和双电压集成比较器芯片 LM393 组成的电器系统^[3],此类系统体积小,但监测精度和范围不高,且不能用于有电磁干扰的环境,有一定的应用局限性。而光纤液漏传感器种类繁多,设计灵活多样,自身免疫电磁干扰,且非电测量不会造成海水接触短路、漏电等影响,利用光纤能够实现分布式或准分布式液漏测量,在获取液漏信息的同时,实现漏点定位,具有广阔的科研前景,目前已经成为国内外研发的热点方向^[4]。

收稿日期:2021-04-14

^{*} 基金项目:山西省自然科学基金项目(201803D121050)资助

本文利用 POF 光纤外部光源侧向耦合扫描传感方式,设计出了一套基于 STM32 的光纤侧向耦合漏液监测系统,可以准确识别漏液信息及其在特定环境中的位置。还设计了相关的上位机来进行漏水的检测,本系统具级联灵活,成本低廉、扩展性强的特点,可充分应用于一些特定环境的漏液监测。

1 传感原理与系统总体设计

1.1 传感原理

光纤侧向耦合漏液监测探头的剖面结构如图 1 所示,其中主要有聚合物光纤(plastic optical fiber, POF)和柔性 RGB 的 LED 灯带。该传感器主要应用光纤侧向耦合效应,即在 POF 光纤的侧面施加外部光源,在光纤的末端采集侧向光源耦合到光纤内地光功率变化。

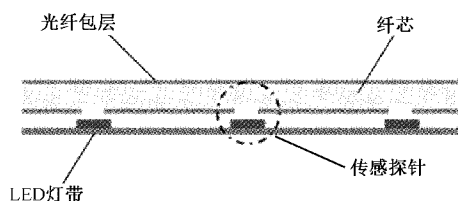


图1 漏液检测探头的剖面结构

LED 灯珠表面封装有透明有机硅树脂,用来调节发光强度的角度分布,使 LED 发出的部分光线通过有机硅树脂和空气界面耦合到 POF 光纤中。单个光纤传感探针的入射光路传输界面如图 2 所示,LED 灯的有机硅树脂的折射率 n_1 约为 1.53,耦合区域(空气或液体)的折射率为 n_2 ,光纤纤芯和光纤包层的折射率分别为 n_3 、 n_4 ,其中 n_3 约为 1.363, n_4 约为 1.49。图中①处光路表示从灯珠发出的光线经有机硅树脂进入耦合区域,②处表示耦合区域的光经缺陷机构传输到光纤纤芯的光线,由图可知当漏液从有机硅树脂和光纤之间的缝隙渗透到耦合区域时,耦合区域的折射率 n_2 将会发生改变,通过耦合区域进入光纤中的光强也会随之改变。当耦合区域由空气($n=1.00$)变为漏液(如水, $n=1.33$)时,由折射定律可知,相同的入射角 θ_{i1} 情况下,折射角由 θ_{r1} 变为 θ_{r2} ,所以在①处有更多的光线经有机硅树脂折射到耦合介质中。同时在②处,在相同的入射角 θ_{i2} 的情况下,折射角由 θ_{r3} 变为 θ_{r4} ,进入耦合介质中的光线同有更多的耦合到聚合物光纤中^[3-6]。

当 θ_{i3} 等于或大于聚合物光纤的临界角 ($\alpha_c = \sin^{-1}(n_4/n_3)$),光线才能真正耦合到聚合物光纤中并在纤芯中传输,否则光线会通过多次反射辐射到周围环境^[4]。当耦合区域的折射率 n_2 由 1.00 变为 1.33 时(如②处的光路),耦合到光纤中的光线也会越多,在光纤末端采集到耦合光强有明显增加。

1.2 系统总体设计

漏液监测系统主要包括下一位机硬件与上位机两部分^[7],系统的整体方案设计如图 3 所示,系统传感器设计为

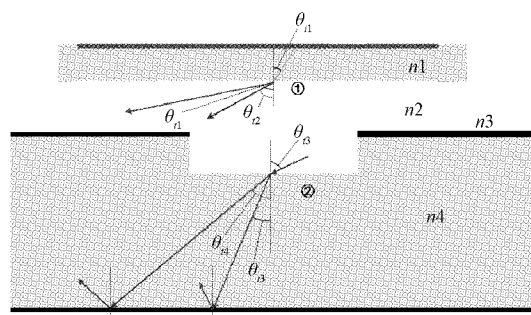


图2 入射光路传输界面

带式样式,每条传感器的测量范围为 1 m,通过光纤传感带的敏感单元采集漏液发生时的光功率变化信号,传输到变换器内转换为电信号并进行通过中央处理器对信号进行处理;通过 422 总线的通信方式,串行级联多条传感器带,传感带采集的数据通过总线向下一条转发,直至数据传输到上位机;上位机内对数据进行处理判断,其用户界面可直观反映每条传感带的每一个传感探头的状态,通过标定没有漏水的状态的基准值和各传感点的阈值,可准确检测各传感点安装位置的漏液状态^[8]。

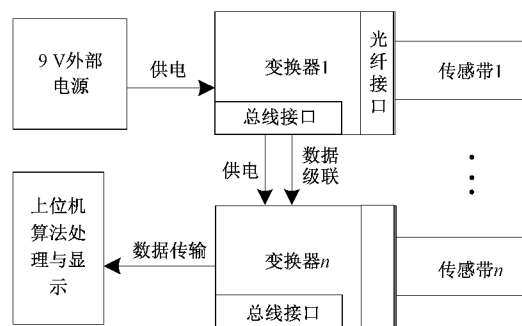


图3 系统整体方案

2 系统硬件设计

2.1 光纤传感带设计

光纤传感带上分布由带缺陷结构的 POF 光纤,LED 灯带以及 2 传感封装外壳组成。光纤选用 2 mm 直径的 POF 光,长为 1 m,用数控微型铣床在光纤侧面加工缺陷结构,每个缺陷结构和 LED 灯珠以及之间的耦合区域组成一个传感探针。LED 灯带由 WS2811 芯片与 RGB 灯珠组成,WS2811 为单线 2 586 级三通道恒流 LED 驱动芯片^[9],LED 灯珠采用 5 mm×5 mm 的方形贴片灯珠光源采用波长 650 nm 的红光光源,灯带电路板基于柔性电路板制作,基材为聚酰亚胺,具有高度的可挠性和可靠性,灯带上每个灯珠都由一片 WS2811 芯片控制,每两个灯珠间距 5 cm。LED 灯带由变换器提供 5 V 电源及灯带扫描控制信号。传感带外壳选用 PVC 材料制作,其主要的功能为导流和保护光纤以及 LED 灯,通过结构将漏液分流到不同的传感探针位置,实现扫描式漏水监测^[10]。

2.2 变换器设计

变换器硬件结构如图4所示,变换器主要包括光电转换模块、信号调理及采集模块、中央控制模块、传感带光源供电及控制模块、总线传输模块、和电源转换模块^[9]。变换器由外部的12 V电源供电,通过电源转换模块转换为变换器内部所需电压。变换器电路中央处理器为STM32单片机,其控制流程为:单片机控制传感带内LED灯的进行跑马灯式的闪烁,LED发出光经光纤缺陷结构耦合到光纤内,经光电转换模块将其转换为电流信号,再通过信号调理模块转换为电压信号,并进行信号放大,经STM32芯片对数据进行分析处理后编帧,发送到总线传输模块,经422总线将数据打包传输到下一条传感带。最终多条传感带通过级联的方式,通过外部接线串接各传感带的变换器,最终级联数据,将全部数据发送到上位机进行数据处理与显示^[11-12]。

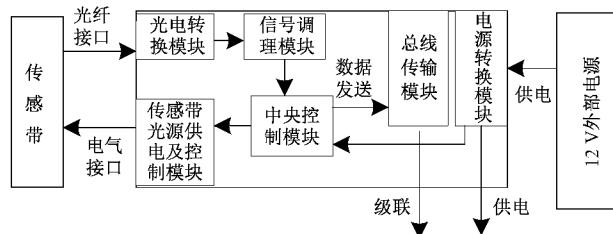


图4 变换器硬件结构

电源转换模块为硬件电路中的各个模块提供各自需要的工作电压,是系统工作的基本保障。变换器的不同部分供电电压不同,中控芯片STM32以及总线传输模块电路的供电电压为3.3 V,信号调理电路的正向端供电电压为2.5 V。

负向端供电电压为-3.3 V,LED灯带的供电电压为5 V,所以电源转换电路内要包含各转换芯片,以证信号调理的正常高效稳定的工作。最终选用LM7805转换芯片将供电电压转换为5 V,选用AMS1117-3.3电源转换芯片将5 V转为3.3 V,选用AMS1117-2.5电源转换芯片将5 V转为2.5 V,选用LM27761电源芯片将5 V转为-3.3 V。

光纤传感带采集的光功率信号经过光电放大器SM05PD1A转换为电流信号,传输到信号调理模块。信号采集放大电路如图5所示,调理电路的主要作用是将信号转换电压信号,并进行信号放大^[13]。其中AD8691芯片为前级跨导放大电路的主芯片,其功能就是实现I/V转换,其中 R_7 为跨导电阻, C_{12} 为匹配电容,其作用通常为了抑制噪声,同时延长或是降低转换时间。为了得到较为稳定的电压值, R_9 的选择一般根据输入光强的量级来选择根据传感器的光强量级,选择了阻值100 k Ω ,精度为0.01%低温漂的电阻,将输出信号量级提升到mV级别,后面二级放大电路由比例放大电路和电压跟随电路组成,采用AD8666芯片为其主芯片。通过调整 R_{12} 与 R_{10} 的配比,使传感探针的信号最终放大到可被有效采集^[13]。

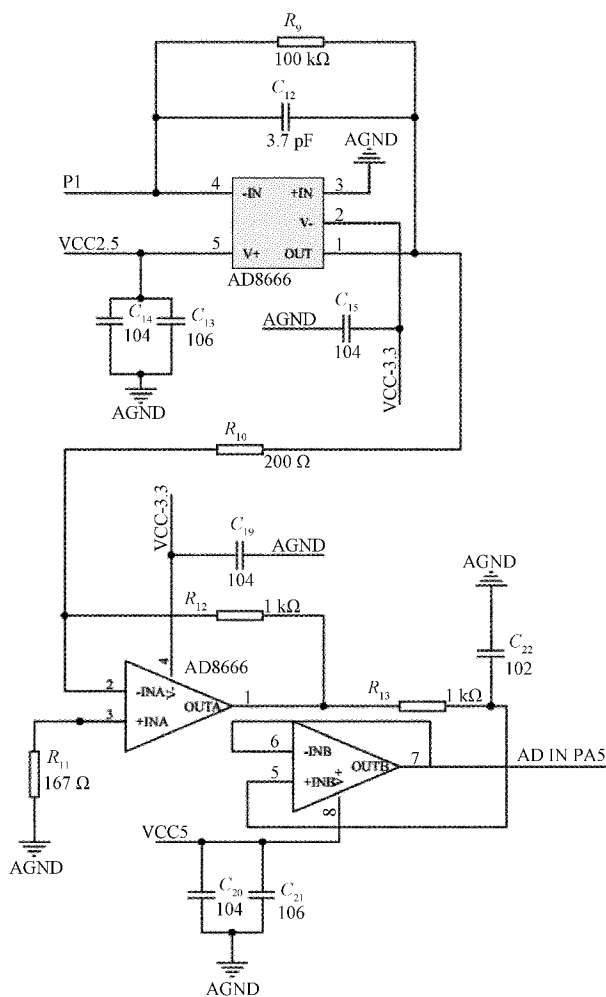


图5 信号采集放大电路

3 上位机设计

3.1 上位机总体设计

用VB设计了上位机软件,上位机与下位机采用USB串口通信,上位机工作流程如图6所示,其主要流程具体为:配置串口波特率、采集基准值、设定传感器阈值、采集值与基准值只差与阈值比较,漏液显示及定位。其中基准值为对应位点的无漏液状态下前120次平均值。由于一般情况下光信号的会是不不断变化的,所以采集回来的数值并不是恒定的,需要有一个阈值,以防止判定失误出现漏报或是误报的情况发生,其中阈值根据基准值设定,通过多次测试漏液状态数据与基准取差值的平均值后,然后将均值的一半值设定为阈值。

3.2 上位机滤波设计

如图7所示为某一个监测点位发生漏水事件时上位机数据采集监测图,其中③为采集的基准值线,②处表示检测到有漏水事件的一个变化曲线,在当前传感点位无漏液状况时,采集的实测值曲线和基准值曲线是重合的,当发生漏液后,该点的实测曲线发生突变式上升,达到峰值后并保持

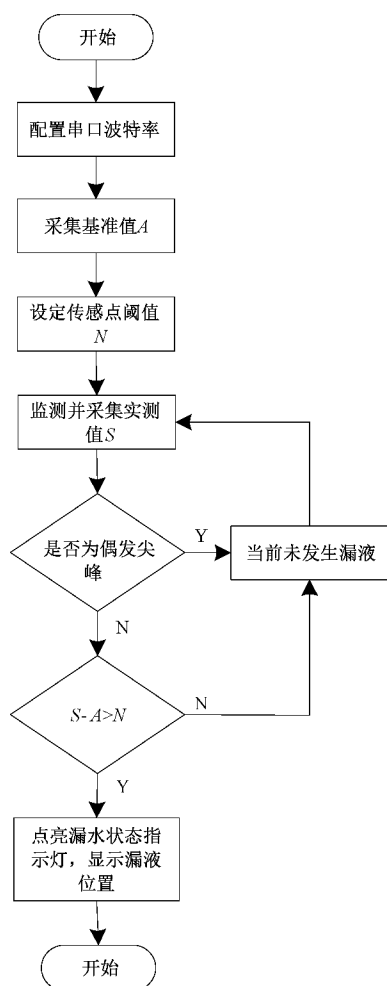


图6 上位机工作流程

较长的一段时间,此时比较其变化的差值与该传感点的阈值,就可判断出漏液状态。

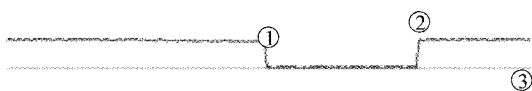


图7 上位监测曲线

实际测量中发现,在未发生漏水情况时,由敏感单元的噪声干扰引起实测值的曲线出现类似于①处的偶发尖峰脉冲,有时尖峰脉冲的值会超过该传感点的阈值,使该点出现误报,所以要在判断阈值之前,要设计算法实现滤除无效的尖峰脉冲,同时保证能识别有效的漏液信号。根据有效的漏液信号比无效的尖峰脉冲保持时间长特点,设计了均差比较的滤波算法来判别突变信号的有效性,达到滤波效果^[14]。

在滤波算法前取传感点的基准值为 X , 阈值为 R , 具体算法为:1)取下位机的实测值依次存 4 位入数组 M 。2)计算各实测值 M_i 与基准值的差 Y_i 。

$$Y_i = |M_i - X| \quad (1)$$

3)计算 Y_i 的均值 \bar{Y} 。

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^4 Y_i}{4} \quad (2)$$

4)计算 Y_i 的平均差 T 。

$$T = \frac{\sum_{i=1}^4 |Y_i - \bar{Y}|}{4} \quad (3)$$

5)计算差值 A 。

$$A = |Y_1 - \bar{Y}| - fT \quad (4)$$

6)判断 A 的值是否 ≤ 0 , 当 A 满足小于 0 时,说明实测值数组中的第 1 个值 M_1 为非偶发尖峰,比较 Y_1 与阈值 R 的大小来判断当前是否发生漏液,同时将数组 M 内数据左移 1 位,数组末尾读入新的实测值,组成新的数组 M ,再跳到步骤 1)重新进行计算。

当 A 值大于 0 时,说明 M_1 为无效数据,将其抛弃,数组 M 内数据左移 1 位,数组末尾读入新的实测值,组成新的数组 M ,再跳到步骤 1)重新进行计算。

其中步骤 5)中的 f 为系数,用来调整敏感阈值, f 值越大,传感器检测漏水的响应时间越短,越灵敏,同时对偶发尖峰的滤波效果越差;当 f 值为 0 时,其滤波效果最好,但传感器响应时间较长,对漏水检测灵敏度较差,需综合考虑选择合适的系数。算法中数组 M 内的数据个数受传感器采集速率和串口波特率影响,同时,算法通过比较数组中最后一位的波动来判断第 1 位的有效性,所以数组内数据跨度不宜太大,综合考虑数组 M 选择为 4 位。

4 系统测试

硬件上位机系统监测界面和系统搭建实物如图 8(a)、(b)所示,图 8(a)中发亮的位置代表该点的对应的传感点发生漏液,图 8(b)中的金属壳为变换器封装壳,内置变换器电路板以及光电探头,同时通过特定结构将两段传感带拼接,实现固定传感带的作用,由于测试环境的限制,将传感带两条串联为 1 组,4 组并行排列,由外部电缆线组合实现系统串行级联^[15]。

通过对系统的各个传感点进行人工加注水和海水等常用液体进行大量模拟漏液测试,实验过程为在系统的所有传感点中随机抽取 50 个点位进行加液测试,记录未识别漏液的的点数和各传感点的响应时间,实验重复测试 10 次。实验数据如表 1 所示。

实验结果表明,漏液监测系统能正常工作,漏检率约为 2%,各敏感单元的响应时间均小于 3.5 s。

选两条传感带放入 SDJS701B 高低温快速温度变化湿热试验箱进行 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的模拟环境实验,实验开始前在室温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下采集系统基准值,实验中在各个温度值保持固定的时间后测试系统工作状态并记录系统正常监测时的采集值与常温下采集值的差值。实验数据如表 2 所示。

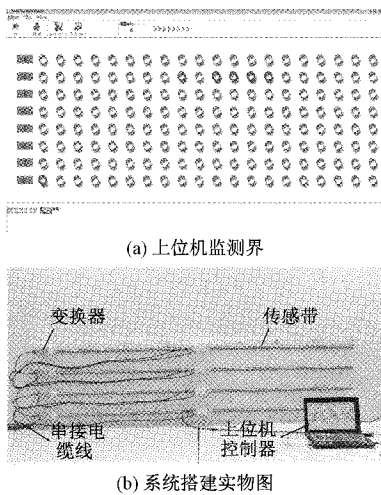


图 8 上位机系统监测界面系统搭建实物图

表 1 系统测试数据

序号	测试点位 个数	漏检个数	平均响应 时间/s	漏检率/ %
1	50	1	2.9	2
2	50	0	2.8	0
3	50	0	3.3	0
4	50	0	3.2	0
5	50	1	2.9	2
6	50	0	2.8	0
7	50	1	3.2	2
8	50	0	2.9	0
9	50	0	3.1	0
10	50	0	2.9	0

表 2 高低温实验数据

温度/ ℃	基准值	保持时间/ h	平均变化 差值	是否正 常工作
-20	50	2	41.2	是
-10	50	2	38.2	是
0	50	2	32.2	是
10	50	2	18.3	是
20	50	2	0	是
30	50	2	-11.2	是
40	50	2	-28.2	是
50	50	2	-45.5	是

分析实验可知,在实验温度之下进行漏液监测,系统工作正常;但传感器采集到的值随温度升高而降低,所以在温度变化超过 20℃ 的时候,各传感点需重新获取基准值,以确保基准值的变化不会引起误报。

5 结 论

本文设计了一种基于 STM32 的光纤侧向耦合的漏液

监测系统。系统传感单元利用带缺陷结构的 POF 光纤和定时扫描的 LED 灯带组成光纤侧向耦合结构,利用该结构能精确识别漏液状态和位置。系统采用滤波算法在上位机中实现对偶发尖峰的滤除,减小了误报率和响应时间,同时提高了传感带的灵敏度。本系统采用直接检测的方式,定位精度高且能用于有电磁干扰的环境,在输送管道,大型水下设备等特殊环境内有较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Y Z, HOU Y L, ZHANG Y J, et al. Continuous liquid level detection based on two parallel plastic optical fibers in a helical structure[J]. Optical Engineering, 2018, 57(2): 026112.
- [2] 刘佳,李大全,刘文怡,等. 基于光纤 FTIR 效应的连续式液位传感器研究[J]. 压电与声光, 2016, 38(6): 81-91.
- [3] 李开良,阮祥,李振界. 基于 LM393 电压比较器的漏液监测报警系统的设计与应用[J]. 中国医疗设备, 2019, 34(4): 80-82.
- [4] 张智娟,郭文翰,徐志钮,等. 基于 Φ-OTDR 的光纤传感技术原理及其应用现状[J]. 半导体光电, 2019, 40(1): 9-16.
- [5] 高小龙. 基于光纤侧向耦合效应的漏水监测系统关键技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
- [6] 侯钰龙,姚嘉迪,邱婉琳,等. 基于光纤多源扫描定位的准分布式漏水传感器[J]. 光学技术, 2020, 46(5): 557-561.
- [7] 江舒,李涛,林杰俊,等. 船用光纤光栅应变传感器开发与应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 35-42.
- [8] 李敏,胡飞,杨会伟,等. 基于 STM32 的程控增益放大电路设计[J]. 芜湖职业技术学院学报, 2019, 21(3): 26-29.
- [9] 樊伟,吴定祥,唐立军. 多角度多阵列 LED 光源控制电路系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2020, 20(8): 69-72, 76.
- [10] LIU C W, LI Y X, YAN Y K, et al. A new leak location method based on leakage acoustic waves for oil and gas pipelines[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 35: 236-246.
- [11] 陆聪,张北伟. 基于 STM32 三轴云台控制系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(9): 75-78.
- [12] 孙仁云,张杨,吴艾蔓,等. 基于车轮六分力的数据采集与分析系统设计[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(7): 15-21.
- [13] 焦海波,费腾. 一种通用线性功率放大器[J]. 声学及电子工程, 2018(3): 21-24.
- [14] 颜上取,汤昊,刘备,等. 基于压缩感知的 HIFU 回波信号降噪研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(11): 19-25.

- [15] 李幸,周凤星,严保康.基于综合滤波算法与模糊PID控制的温度控制系统[J].仪表技术与传感器,2019(3):77-81,96.

作者简介

张峰,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感与系统、嵌

入式智能仪器。

E-mail:2280830503@qq.com

崔永俊,博士,副教授,主要从事纳米测试技术及仪器方向的研究。

E-mail:annayucyj@nuc.edu