

基于 LabVIEW 和光纤传感器的液漏监测系统设计

孙亮亮¹, 郝现伟², 高琬佳³, 董文豪²

(1 北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094

2 北京宇航系统工程研究所 北京 100076

3 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: 针对传统液漏传感器检测精度低、空间分辨率小以及不能实时监测多点位液漏等问题, 利用 LabVIEW 设计了一个基于光纤传感器的液漏监测系统。整个系统包括传感器和上位机两个部分。其中, 光纤带式传感器负责采集漏水点的信号, 其传感功能的实现基于侧向耦合效应。LabVIEW 上位机负责实时监测多点位液漏状态, 实现了采集数据的处理、存储和显示功能。上位机和传感器之间采用 USB 接口通信。实验结果表明, 该系统能够对 8 m 区域范围内, 160 个点点的漏水状态实时精确定位及报警, 漏检率 $\leq 10\%$, 位置精度介于 ± 25 mm, 较传统液漏传感系统, 其空间分辨率提升了 10%。对于当前设备存在的漏检和误报的问题, 给出了误差分析及改进思路。通过 LabVIEW 实时显示多点位漏水状态, 能够提高工作效率, 适用于对漏水监测有较高要求的场合。

关键词: 光纤传感器; 液漏监测; LabVIEW; 实时

中图分类号: V441 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)03-0119-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211020001

引用格式: 孙亮亮, 郝现伟, 高琬佳, 等. 基于 LabVIEW 和光纤传感器的液漏监测系统设计[J]. 遥测遥控, 2022, 43(3): 119-125.

Design of liquid leakage monitoring system based on LabVIEW and optical fiber sensor

SUN Liangliang¹, HAO Xianwei², GAO Wanjia³, DONG Wenhao²

(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;

2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;

3. North University of China Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problems of low detection accuracy, low spatial resolution, and inability to monitor multi-point liquid leakage in real time of traditional liquid leakage sensors, we design a liquid leakage monitoring system based on optical fiber sensor by LabVIEW. The whole system consists of two parts: the sensor and the upper computer. Between them, the fiber optic belt sensor is responsible for collecting the signal of water leakage point, and its sensing function is realized based on the lateral coupling effect. LabVIEW is responsible for real-time monitoring of multi-point liquid leakage state, and realizes the processing, storage and display of collected data. USB interface is used to communicate between the computer and the sensor. The evaluations show that the system can accurately locate and alarm the leakage status of 160 points within 8 m area in real time. Its missing detection rate $\leq 10\%$, position accuracy $< \pm 25$ mm. Compared with the traditional liquid leakage sensing system, its spatial resolution is improved by 10%. The real-time display of multi-point leakage status by LabVIEW can improve the work efficiency and is suitable for occasions with higher requirements for leakage monitoring.

Key words: Optical fiber sensor; Liquid leakage monitoring; LabVIEW; Real-time

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211020001

Citation: SUN Liangliang, HAO Xianwei, GAO Wanjia, et al. Design of liquid leakage monitoring system based on LabVIEW and optical fiber sensor[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(3): 119-125.

引言

在航空航天等应用领域中, 对于运载火箭中火箭燃料推进剂以及冷却液系统等液体泄漏的监测非常重要^[1]。液漏监测的准确性和实时性与传感器件, 测量系统及上位机软件紧密相关^[2-3]。目前的液漏监测一般采用诸如此类 XW-PC-3 型定位控制器传统仪器^[4]。航空航天上的设备要求具有结构灵活, 能实现多种功能, 精度高以及实时监测等特点。而传统的液漏测量仪器无法满足航天需求, 且其空间分辨率基本都超过 0.5 m, 远大于航空航天设备要求的 0.05 m。因此必须寻找一种全新的检测方式。

光纤传感器具有对电磁干扰不敏感, 绝缘且可实现分布式等特点^[5], 使其对于航空航天这类高风险特殊应用环境具有很大的优势。因此, 将光纤传感这种较新的测量方式应用在航天漏液检测中是较为适宜的选择, 其对于航空航天燃料推进剂的安全起到了关键作用^[6]。LabVIEW 是一种较为新颖的虚拟仪器, 其程序采用框图形式, 用户可以根据自己的需要构建出各类仪器模块, 软件具有交互式图形界面开发功能, 方便用户自行设计模块和使用。可实现接收端的读取、显示、保存和后端数据分析处理功能^[7-8]。同时还能实现个性化功能。综上, 本文基于 LabVIEW 和光纤传感器设计了一种新型液漏监测系统。给出其系统整体设计方案, 根据设计方案搭建了传感检测单元, 并设计了用户友好型上位机操作界面。最终通过实验验证了系统的完整性及可靠性。

1 系统方案设计

本文设计的漏液监测系统由传感器和上位机两部分构成。传感器分为带式传感器和变换器。其中, 漏水检测主要由带式传感器完成^[9]。变换器的主要功能是接收信号的量化以及编帧, 变换器与上位机之间的数据传输由 422 接口完成^[10]。用 LabVIEW 设计上位机的检测界面。它具有强大的数据处理能力, 能将采集到的数据进行处理、存储和显示^[11]。友好的用户界面可以实时观测漏水的情况。如图 1 所示, 为系统整体方案。

根据侧向耦合效应设计实现了本文的漏液传感器^[12]功能。为了减少光纤的损耗, 并实现设计的简洁化, 将传感带的长度设计为 1 m, 平行布置 8 条传感带, 实现 8 m 范围的漏水监测。LED 灯带程序可控, 以三个 LED 灯珠为一个单元, 每个单元为 5 cm, 因此可实现空间位置精度 $\leq \pm 25$ mm。RS422 总线串行多个测量单元。422 总线采用全双工传输^[13], 传感带检测的数据转发至下一条传感带上, 逐次向下直至数据进入上位机。

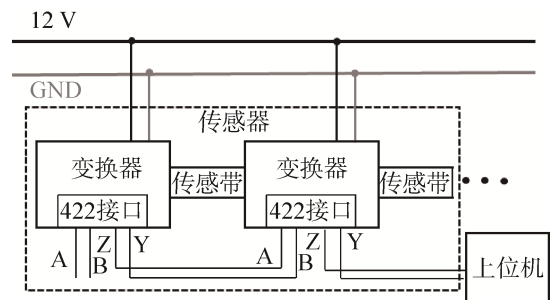


图 1 系统整体方案

Fig. 1 Overall system scheme

2 系统关键技术设计

本系统主要包括前端传感器漏水检测单元以及后端上位机数据处理单元。

2.1 传感器设计

本文设计的系统基于光纤检测法, 用光纤作为传感器。系统包括多个传感单元, 每一个传感单元由带式传感器和变换器组成。其中带式传感器含有多个传感探针。它是整个液漏检测系统的最小单元。传感探针用 LED 红色二极管作为光源。一条带式传感器包含 20 个探针。

变换器由弱光检测单元、主控单元和数据传输三部分构成^[14]。

首先将光信号转换为电信号, 并且将模拟量进行放大, 这部分由弱光检测单元实现。主控单元包括三个模块。液漏传感器的扫描频率由传感器扫描控制模块实现。LED 灯带顺序扫描, 由主控单元发送的地址递增码来控制的。ADC 模块将模拟信号转换为数字信号^[15]。光信号易受各种因素干扰, 为了防止干扰的光强脉冲对原型系统测试造成影响, 设计了数字滤波模块。数据传输模块充当一个中转站的角色, 它连接前后两个传感单元, 实现数据传递, 最终使数据传至上位机。单个带式传感器及变换器设计框图如图 2 所示。

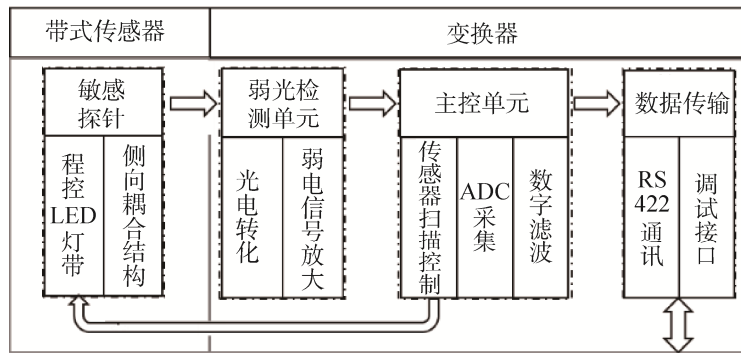


图2 传感器及变换器设计框图

Fig. 2 Sensor and converter design block diagram

2.2 上位机设计

本文利用NI公司的开发工具LabVIEW进行上位机设计，与传感器的通信通过USB接口^[16]。该上位机能够显示出每一个探针位点及其采集位点的数据，判断并定位出了漏液事件的发生。上位机的设计流程主要包括基准值设定、标定、阈值判断、状态显示等。由基准值对数据进行标定，只需要标定一次，后续不用重复标定。漏水状态的主要指标由上述标定的阈值来决定。上位机设计流程图如图3所示。

2.2.1 基准值设定

传感器需要判断有漏水和无漏水两种状态。因此，首先要设置一个基准值作为漏水检测系统的正常状态，对比正常的状态，即可判断是否漏水。基准值 X 可由公式(1)求得。

$$X = \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{10} X_i}{10} \quad (1)$$

系统开始工作后，首先将前10个周期的数据采集，取其平均值作为基准值。每一个数据对比相对应传感探针的数据，将其保存，与后续的采集值对比。基准界面及其局部放大图如图4所示。其中，绿色标识框内的显示是参照基准值。

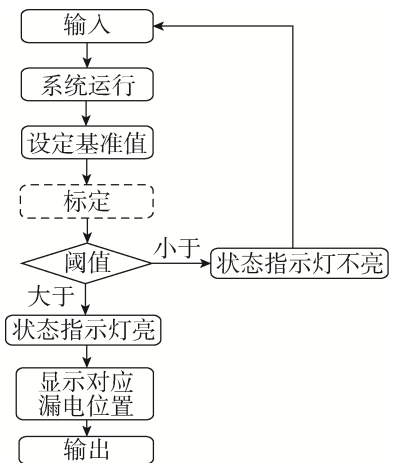


图3 上位机流程图

Fig. 3 Upper computer flow chart

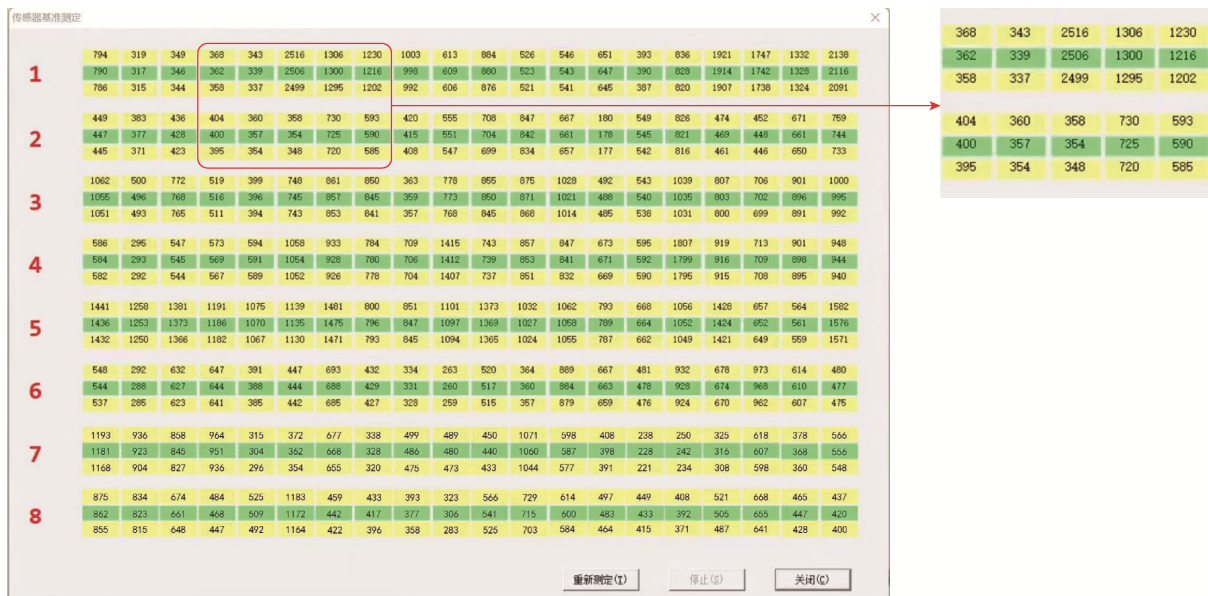


图4 上位机基准值设定界面

Fig. 4 Upper computer datum setting interface

2.2.2 系统标定和阈值设定

当基准值设定好之后, 运行测试, 将读取的传感探针测量值 M 与基准值 X 做差值。在没有漏水事件发生时, 差值几乎为零。标定的作用使得实测值更加贴近理论, 即减小测量误差。同时也是阈值判断的一个重要过程。

为了找到监测漏水事件是否发生的判断标准, 设定阈值尤为重要。多次测量探针实测值 M_i 并与基准值 X 做差值后求出平均值, 取其一半设定为阈值。阈值 R 的求取满足公式 (2) 和 (3)。

$$Y_i = |M_i - X| \tag{2}$$

$$R = \frac{\bar{Y}}{2} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{2n} \tag{3}$$

通过基准值设定、系统标定及阈值设定可以提高系统的灵敏度。使用 LabVIEW 设计的程序阈值判断流程如图 5 所示。

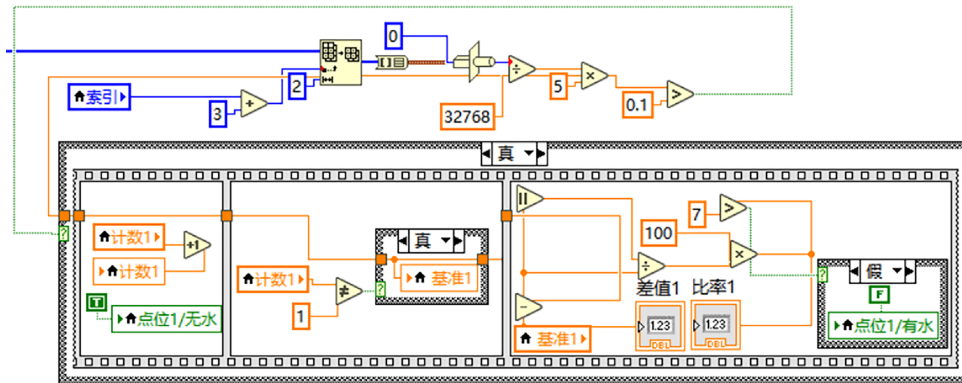


图 5 程序阈值判断流程设计图

Fig. 5 Procedure threshold judgment flow design diagram

2.2.3 实时监测显示设计

图 6 展示了上位机实时测量界面。此界面实时显示传感探针的扫描数据。第二行有灰色背景的数据为基准值, 第一行红色数据为实时监测值。每次扫描周期实时刷新数据, 显示出新的监测值。每个周期的值并不是完全相等的, 但其上下波动的范围很小, 因此说明了传感器的可靠性。

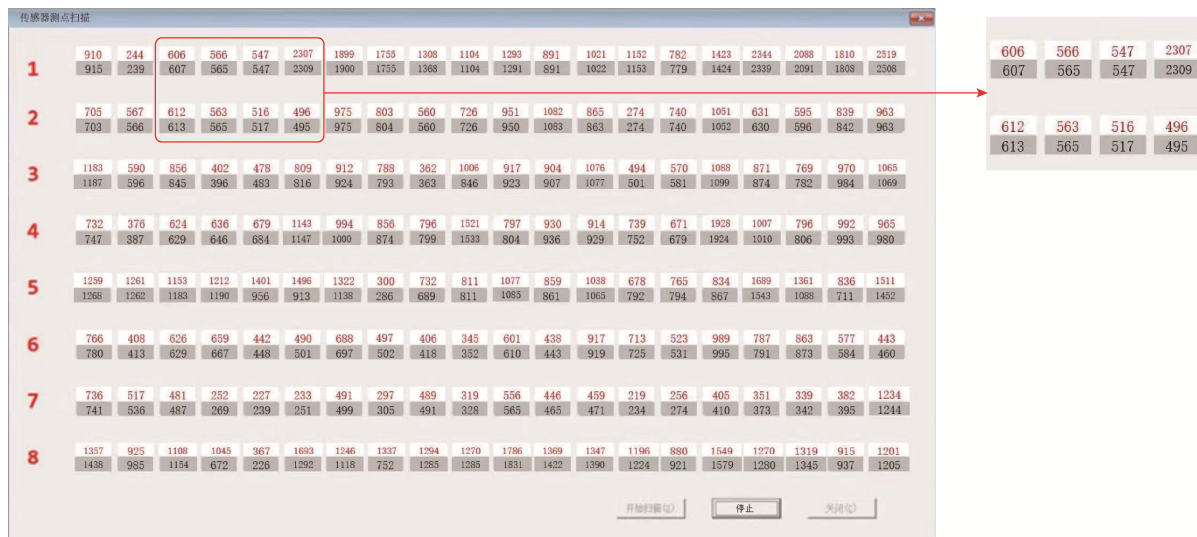


图 6 实时测量界面

Fig. 6 Real-time measurement interface

当某一个位置发生漏水事件时，采集到的数据波形发生明显的波动，形成了“阶跃脉冲”。根据采集数据是否有波动，来判断是否有漏水事件发生。

漏水事件的发生与否在上位机上显示为“0”和“1”。本文优化了用户使用界面，如图 7 所示。升级后的界面更加简洁直观，并且能够同时对 160 个点位进行监测。漏水事件可以通过软件界面中的 LED 显示，灯亮表示当前点位发生漏水事件，灯灭表示没有事件发生。通过传感带的不断扫描，可以实时确定事件的发生与否及发生位置。用户可以实时监测漏水点位置，实现快速定位，及时处理。

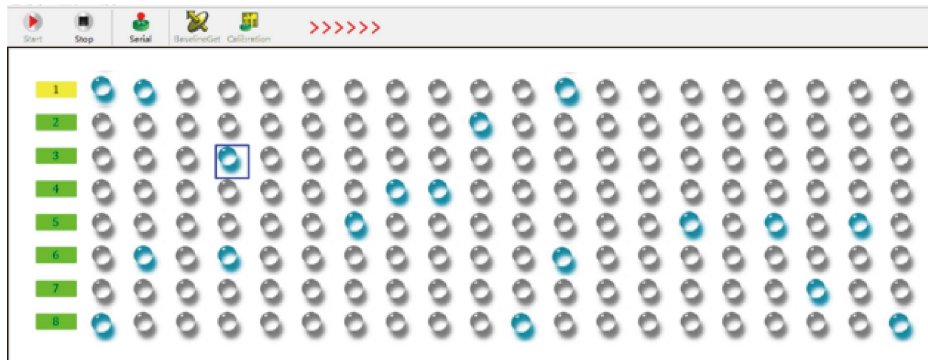


图 7 上位机多点位实时监测结果图

Fig. 7 Multi-point real-time monitoring result diagram of upper computer

3 实验结果与分析

在实验室搭建一个漏水监测系统平台，模拟航空航天设备的环境。用平面的亚克力板固定传感带，用特定的电缆连接。该系统数据发送波特率为 921.6 kb/s。使用滴管从某一传感点位注入一些水，观察上位机的实时监测界面指示点位的状态变化。分别选取 15 个不同点位进行测量，记录每一点无水与有水的实测值、阈值以及差值，实验结果见表 1 所示。

表 1 实验结果数据表
Table 1 Data of experiment results

编号	无水时实测值	有水时实测值	阈值	差值	是否检测到漏水
1	533	625	35	92	是
2	528	616	50	88	是
3	440	524	40	84	是
4	465	531	50	66	是
5	510	592	50	82	是
6	439	597	50	158	是
7	422	483	45	61	是
8	430	614	50	184	是
9	315	435	50	120	是
10	347	476	50	129	是
11	491	594	50	103	是
12	459	546	40	87	是
13	433	524	40	91	是
14	382	446	30	64	是
15	499	586	50	87	是

传感探针总量为 160 个，随机选择 50 个来测试系统可靠性。由实验结果可得，其中状态监测界面有 46 个点为亮，剩余 4 个点未被检测到。从而得出此次测量的漏检率为 8%。

通过多次实验测得, 本系统漏检率 $\leq 10\%$ 。随机选取系统中任意位置进行液漏试验, 由上位机实时监测系统对多点位同时监测。截取的上位机测量结果如图 7 所示。其中蓝色为灯亮状态表示该点处有液漏事件发生, 灰色为灯灭状态表示无液漏事件发生。

经研究发现, 光通过缺陷结构耦合到光纤内的耦合率与开孔孔径、孔径深度、开孔数目成正相关, 同时缺陷结构对光纤内信号传输时所造成的衰减率与这些参数也成正相关。首先, 若被测点光纤的缺陷结构加工不合理, 造成该点的缺陷结构对漏液的灵敏度不高, 测量会出现漏检。每一条光纤灯带都是人工制作, 可能使得每个点的灵敏度有细微差别导致出现漏检。其次, 为防止传感带腔内的液体横流和堆积, 传感点设计的液体纵向流通性良好, 但由于“出浴效应”, 在漏液处液滴流动过快, 光纤的缺陷结构处无法形成有效的漏液堆积, 使得传感点检测不到漏液。

针对此问题, 可以通过合理安排缺陷结构的深度等参数, 将手工加工改为统一的自动化机器加工。同时在传感光纤的检测点处增加一个微型的阻挡装置来增加液滴停留的时间, 同时选择灵敏度更好的光功率探头减少漏检。

当上位机上的传感点的阈值设置较小值且未发生漏水时, 敏感单元的光噪声造成干扰, 使采集数值在短时间内出现脉冲式突增, 该脉冲值可能会超过该位点的阈值, 出现误报。

针对上述问题, 可以通过在采集数据后添加过滤算法, 将短时间内的脉冲突增信号滤除。同时把光路改为暗场, 选择更稳定的光源, 减少光污染, 降低光噪声干扰, 从而减少误报。

4 结束语

本文使用光纤作为传感器设计了一个漏水监测系统, 并且介绍了 LabVIEW 设计的上位机数据实时显示界面。该系统基于光纤传感器实现了实时监测液漏状态以及数据采集处理的功能, 并且用 LabVIEW 实现了用户直观且实时监测液体泄漏事件是否发生的功能。设计的上位机界面操作简便, 用户友好。实验结果表明, 本文设计的漏水监测系统可实现 8 m 区域内 160 个点位的精确漏水定位及报警。漏检率 $\leq 10\%$, 位置精度介于 ± 25 mm。相较于现有的液漏传感器, 空间分辨率提升了 10%。比传统液漏传感器具有更高的检测精度及范围。对于当前设备存在的漏检和误报的问题, 给出了误差分析及改进思路。利用 LabVIEW 高级编程软件从根本上改变了传统的编程习惯, 而用图形化界面代替, 不仅在很大程度上降低了编程者的难度, 也使用户使用更加便捷直观。本文设计的液漏监测系统可以很好地应用在运载火箭的高功率放大器液冷系统中, 具有很好的应用价值。

参考文献

- [1] 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.
LI Kailiang, RUAN Xiang, LI Zhenjie. Design and application of leakage monitoring and alarm system based on LM393 voltage comparator[J]. China Medical Devices, 2019, 34(4): 80–82.
- [2] 顾乃亚. 加强我国环境监测仪器管理[J]. 环境与可持续发展, 2014, 39(5): 88–89.
GU Naiya. Environmental monitoring instrument management[J]. Environment and Sustainable Development, 2014, 39(5): 88–89.
- [3] 付耀衡, 彭泳卿, 刘鹏, 等. 基于图像处理的液位测量技术研究现状与发展趋势[J]. 遥测遥控, 2020, (4): 18–27.
FU Yaoheng, PENG Yongqing, LIU Peng, et al. Status and development trend of image liquid level measurement technology[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2020, (4): 18–27.
- [4] 张樱子. 基于塑料光纤侧面耦合效应的液漏传感关键技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [5] 杨洋. 光纤 F-P 干涉传感器高分辨动态解调技术及应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [6] 杜玉环. 基于新型光纤传感器的涡轮流量测量技术及应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- [7] 郑玲玲, 张金, 刘芳, 等. 基于 LabVIEW 和 Arduino 的温湿度采集系统设计[J]. 中国科技信息, 2021, (6): 81–83.
- [8] 张文. 基于虚拟仪器的实验室建设研究[J]. 内江师范学院学报, 2004, (2): 95–98.

- ZHANG Wen. The network experiment research based on virtual instrument[J]. Journal of Neijiang Teachers College, 2004, (2): 95–98.
- [9] 刘佳, 李大全, 刘文怡, 等. 带式漏水传感技术及定位方法的研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(27): 183–187.
LIU Jia, LI Daquan, LIU Wenyi, et al. Study on belt leakage sensing technology and positioning method[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(27): 183–187.
- [10] 任勇峰, 胡振良, 李圣昆. 基于FPGA的多路数字量采集模块设计[J]. 国外电子元器件, 2008(5): 47–49, 52.
REN Yongfeng, HU Zhenliang, LI Shengkun. Design of multi-channel digital signal collecting module based on FPGA[J]. International Electronic Elements, 2008(5): 47–49, 52.
- [11] 李红刚, 张素萍. 基于单片机和LabVIEW的多路数据采集系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(4): 62–67.
LI Honggang, ZHANG Suping. Design of multi-channel data gathering system based on STC single chip micro-computer and LabVIEW[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(4): 62–67.
- [12] 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.
- [13] 任朋利, 刘峰华, 邵志豪. 引信RS422总线全双工通讯装定方法[J]. 电子设计工程, 2014, 22(3): 66–68, 72.
REN Pengli, LIU Fenghua, SHAO Zhihao. A fuse programming method based on RS422-bus full duplex communication[J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22(3): 66–68, 72.
- [14] 于亚男. 位置敏感探测器的微弱光电流检测系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [15] 种兴静, 高军伟. 基于LabVIEW的电压电流实时监测系统设计[J]. 自动化与仪表, 2019, 34(6): 59–62.
CHONG Xingjing, GAO Junwei. Design of real-time monitoring system of voltage and current based on LabVIEW[J]. Automation & Instrumentation, 2019, 34(6): 59–62.
- [16] 尹小曼. 基于MSP430西宁市湟水河水环境监测系统设计[D]. 西宁: 青海师范大学, 2019.

[作者简介]

孙亮亮 1981年生, 学士, 助理研究员, 主要研究方向为航天ZB保障。

郝现伟 1985年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为箭载电气系统设计。

高琬佳 1992年生, 博士, 主要研究方向为超声波传感器。

董文豪 1989年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为运载火箭总装测试ZB机电一体化设计。

(本文编辑: 潘三英)