

长距离光纤油气管道预警监测系统设计

闫建行¹, 玄兆燕¹, 谢世满¹, 杨智伟², 刘倩¹

(1. 华北理工大学 机械工程学院, 河北 唐山 063210; 2. 唐山市天然气有限公司, 河北 唐山 063020)

摘要: 针对长距离油气管道预警信号所产生的庞大信息量问题以及预警信号精准识别问题, 提出以现场可编程门阵列(FPGA)和数字信号处理器(DSP)作为硬件平台核心部件的预警系统, FPGA 主要完成预警信息的高速采集控制, DSP 主要进行大信息量及预警信号精准识别算法的快速处理, FPGA 和 DSP 通过高速接口进行数据传输, 以实现对管道入侵行为进行迅速而精准的报警。完成了上位机和下位机的各功能模块设计, 采用 C# 开发语言进行了软件系统设计, 通过网络协议的通信方式实施对管道系统的实时监测。最后对系统进行了实验验证, 证明了系统的可行性及准确性。

关键词: 预警监测系统; 光纤预警; FPGA 和 DSP; 背向瑞利散射; 管道监测; 软件流程

中图分类号: TN929.11; TP277 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)01-0023-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.01.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of early warning and monitoring system for long distance optical fiber oil and gas pipeline

YAN Jianhang¹, XUAN Zhaoyan¹, XIE Shiman¹, YANG Zhiwei², LIU Qian¹

(1. College of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei 063210, China;

2. Tangshan natural gas Co. Ltd., Tangshan Hebei 063020, China)

Abstract: Aiming at the problem of huge amount of information generated by long-distance oil and gas pipeline early warning signal and accurate identification of early warning signal, an early warning system was proposed, which core components of the hardware platform is field programmable gate array (FPGA) and digital signal processor (DSP), the control of high-speed collection of early warning information is mainly accomplished by FPGA, the fast processing of high-volume information and precise recognition algorithm of early warning signal is mainly accomplished by DSP, data transmission between FPGA and DSP is carried out through high-speed interface to realize rapid and accurate alarm for pipeline intrusion. Completed the design of each functional module of the host computer and slave computer, the software system is designed with C# development language, and the real-time monitoring of pipeline system is implemented by means of communication of network protocol. Finally, the feasibility and accuracy of the system are proved by experiments.

Key words: early warning monitoring system; optical fiber early warning; field programmable gate array and digital signal processor; backward rayleigh scattering; pipeline monitoring; software flow

0 引言

光纤传感器以其抗电磁干扰性强、电绝缘性好、传感器无源、灵敏度高、测量范围广以及复杂环境适应性

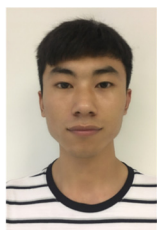
强等优点, 被广泛应用于长距离管道预警监测系统中。

文献[1]采用干涉型分布式光纤传感技术, 其具有无盲区、灵敏度极高和实时性好等特点; 文献[2]采用Φ-OTDR 光纤传感技术, 具有实时反应速度快、探测距离较长和定位精度高等特点。这 2 种形式的传感器在外力及温度等外界环境变化下传输光会产生随机退化, 容易产生“偏振诱导衰落”与“偏振诱导相位偏移”现象, 致使光强信号特征改变而引起系统误报, 同时信号的相关程度会降低入侵信号的定位精度。文献[3]设计了一种低成本光纤预警监测系统, 具有便携与实

收稿日期: 2019-07-31。

基金项目: 唐山市科技计划项目(18110202A)资助。

作者简介: 闫建行(1994-), 男, 硕士研究生, 现就读于华北理工大学机械工程学院, 专业方向为机电系统测控技术, 主要从事长距离光纤预警监测系统搭建, 进行光纤信号分析、特征提取、特征融合和模式识别等算法研究。



闫建行,玄兆燕,谢世满,等:长距离光纤油气管道预警监测系统设计

时性好、信噪比高和漏报率低的特点,但受到硬件局限难以实现长距离预警监测。长距离光纤所产生的信息量庞大,使信号采集及传输的快速性及准确性受影响,因此,需要设计出能够降低信号采集和传输的延迟、提高信号分析和识别的精准度的预警监测系统。

为此,本系统基于相干瑞利散射型光纤结构,采用现场可编程门阵列(FPGA)为核心的采集卡,与数字信号处理器(DSP)相配合,FPGA和DSP之间通过高速数据接口进行数据传输^[4,5],以解决大信息量的信号采集与传输问题,同时利用DSP对信号处理与分析的快速性解决系统响应不及时的问题。

1 硬件系统设计

光纤预警硬件系统主要由分布式光纤传感模块、信号采集模块、信号处理模块和显控设备组成。分布式光纤传感模块负责产生载有振动信息的干涉光,并把载有振动信息的干涉光传递给光电探测器;光电探测器负责把光信号转换成模拟电信号;数据采集模块负责将电信号进行放大,再转换成数字信号,随后传输给信号处理模块;信号处理模块负责信号前期处理及特征识别等算法运算,识别报警类型及定位,同时把计算结果传输给显控设备;显控设备负责显示报警地点及报警类型。预警监测系统原理框图如图1所示。

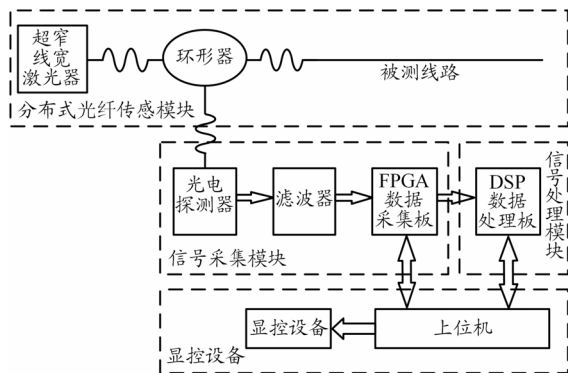


图1 预警监测系统原理框图

1.1 光纤传感模块结构及定位原理

基于相干瑞利散射分布式光纤传感系统光路部分如图2所示。调制器将激光产生的连续光调制为脉冲光,脉冲光经环形器注入传感光纤中,传感光纤的各个位置都会有背向瑞利散射光产生。当外部干扰引起光纤振动时,在弹光效应下该处的折射率将发生变化,从而影响后向散射光的相位,即背向瑞利散射光与光脉冲通过环形器在光电探测器处产生干涉,光

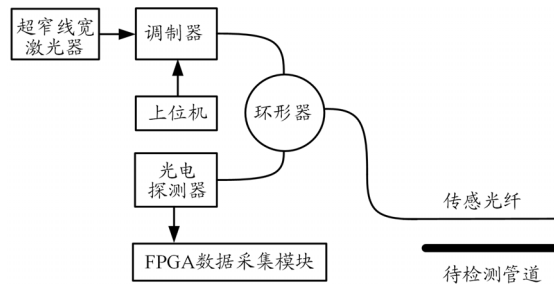


图2 光路系统

电探测器将载有受外界扰动相位调制的干涉信号转换为电信号,电信号会传输至FPGA数据采集模块做进一步的转换。

系统定位散射曲线图如图3所示,在21000 m附近扰动后散射曲线有明显变化。当管道沿线环境处于稳定时,光纤产生的瑞利散射光曲线是保持不变的,即散射光的干涉结果保持不变。当管道沿线出现破坏时,此处的背向瑞利散射光及返回的散射曲线发生改变,利用扰动信号传播到光电探测器所用的时间,计算出破坏行为的具体位置。

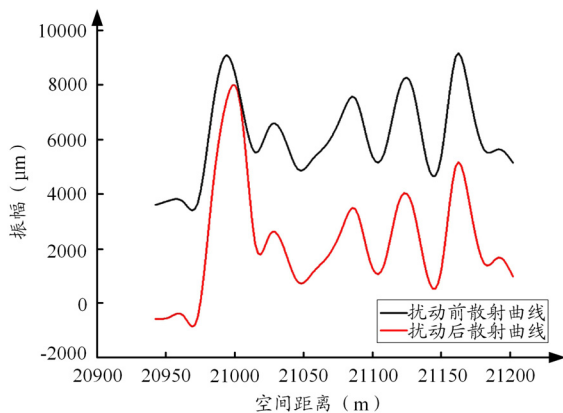


图3 系统定位散射曲线图

1.2 FPGA 信号采集模块

光纤预警监测系统会实时监控管道的安全,由于分布式传感光纤信息量特别大,给信号采集带来一定的困难,本系统选用苏州至禅光纤传感技术有限公司的2通道500MSPS采集卡,这款数据采集卡以xilinx7系列FPGA作为数据采集和信号处理芯片,可以采集2路模拟信号,最高采样频率为500 MHz,具备通用I/O接口、5个10 pin的功能扩展口,且具备千兆以太网口。

1.3 DSP 信号处理模块

DSP芯片是一种特别适合进行数字信号处理的微处理器,用于实时快速地实现各种数字信号处理算

法。DSP 芯片可以并行执行多个操作,对同一组信号进行不同形式的算法处理时能起到事半功倍的效果。DSP 的选取主要在于芯片的运行速度,DSP 芯片的运行速度决定着是否能够达到系统信息处理量的要求,因此,系统选用创龙公司的 TL6678-EasyEVM 开发板,此开发板是基于 TI KeyStone C66x 多核定点/浮点 TMS320C6678 DSP 芯片开发的^[7]。

1.4 信号传输流程

用管道周围土壤的振动来检测沿线几十千米油气管道的安全是这个硬件系统的任务,系统信号传输流程如图 4 所示。激光器发出的连续光经过调制器调制为脉冲光,脉冲光经环形器注入分布式传感光纤中,脉冲光在光纤中会发生散射效应,光纤沿线的振动信号附加到散射光当中,带有管道周围振动信号的背向散射光会被光电探测器转换成电信号,此时电信号还是模拟信号,FPGA 会控制模拟开关使采集卡对模拟信号进行采集,采集卡集成了滤波器、运算放大器和模数转换器;在采集卡中会对信号进行降噪、滤波和放大处理,模数转换器把初步处理的模拟信号转换成数字信号,由千兆以太网口传输至 DSP,DSP 主控芯片会对数字信号按编写好的算法进行运算,把运算

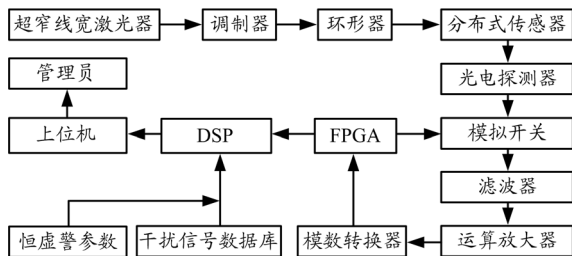


图 4 系统信号传输流程

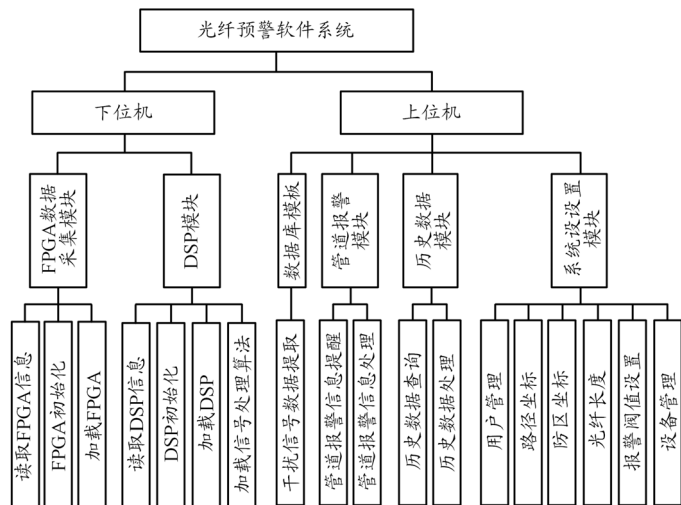


图 5 光纤预警软件系统

结果传输到上位机,上位机将显示报警信息并将报警信息发送至管理员,完成信号传输的整个过程。

2 软件系统设计

软件系统涉及信号采集、信号转换、数据处理、信号识别和报警提示等多个部分。本文按照由上到下对软件进行设计,首先分为下位机和上位机 2 部分,再对上位机和下位机进行逐一细化,最后按照逻辑顺序将多个细化的功能模块进行串联,设计出光纤预警软件系统结构如图 5 所示。

2.1 下位机设计

下位机主要包括 FPGA 数据采集模块和 DSP 数据处理模块。本文通过对 FPGA 程序的设计,实现管道沿线振动信号的采集、转换和传输功能。FPGA 数据采集模块的程序流程图如图 6 所示,系统启动时上位机把 FPGA 文件以流的形式写入,加载成功后,初始化 FPGA 内部参数,进行振动信息采集,并对数据进行初步滤波处理,再进行模拟信号到数字信号的转换,最后将数据高速传输至 DSP 模块。

DSP 模块实现与 FPGA 高速互联、数据处理、模式识别和报警信息上传功能。

DSP 流程如图 7 图 6 FPGA 数据采集流程 图 7 DSP 流程

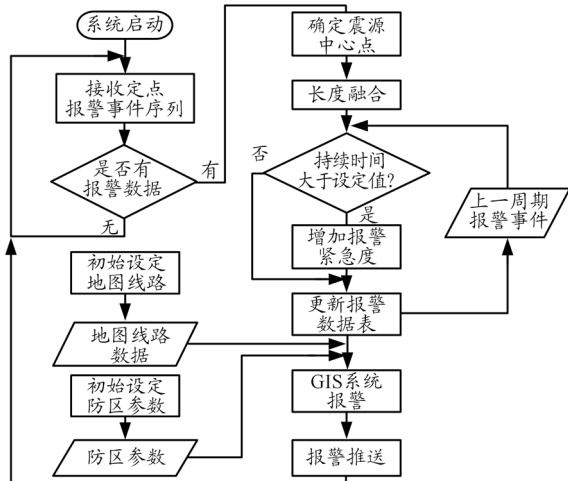
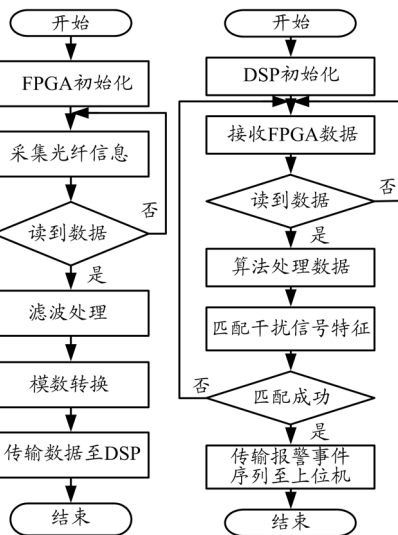


图 8 上位机程序流程

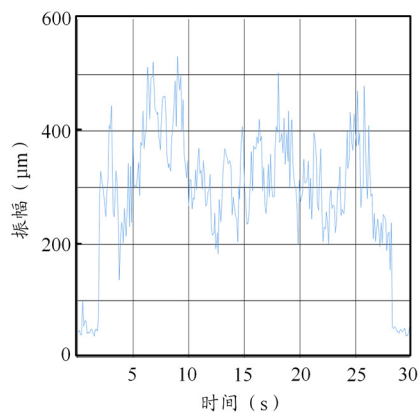


图9 机械挖掘振动信号

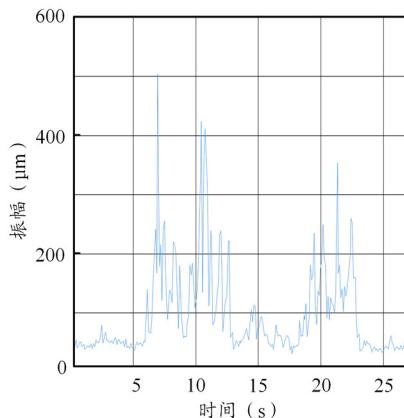


图10 打孔盗油振动信号

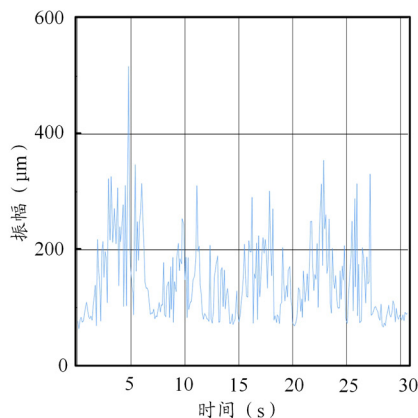


图11 人工挖掘振动信号

所示,程序运行开始先读取 DSP 信息,再对 DSP 进行初始化,将接收到的数字信号按预设好的算法进行运算,算法运行的目的是从入侵信号中提取特征信息,对提取到的特征信息与数据库中的信号特征信息相匹配,最后将特征信息匹配成功的信号传输至上位机,最终达到识别入侵信号的目的^[8]。

2.2 上位机设计

油气管道预警监测系统软件采用 C# 开发语言及 SQL Server 数据库完成软件系统设计,通过网络协议的通信方式,随时可以监测到管道线路安全情况。上位机程序流程如图 8 所示,上位机系统接收来自 DSP 数据,先对报警信息进行定位分析,确定振源中心点,判断振动时间长短,确定是否需要加急报警,再将报警数据表更新,把上一周期报警时间进行储存,便于历史时间查询;报警数据表、地图数据和防区参数会在 GIS 系统中进行融合,最后推送包含入侵位置和入侵形式的信息。

预警监测系统主要功能包括:接收、处理振动报警信息;管道报警提醒和处理;历史数据查询和处理。

3 系统测试

为验证系统可行性及准确性,本文在 21 km 处分别做了机械挖掘实验、打孔盗油实验和人工挖掘实验,系统发现扰动时立即对破坏位置进行定位,将检测到的数据进行分析,从而与数据库中不同信号的特征信息相匹配,最终确定报警位置及报警类型。系统采集到的原始振动信号分别如图 9、图 10 和图 11 所示(提取了每种特定入侵信号 30 s 的原始数据)。

在管道铺设线路的 21 km 处实际破坏中,当对地表土壤进行破坏时,预警监测系统经过信号采集、分

析和识别,均在短时间内做出了准确的报警,起到了对油气管道预警的作用。

4 结束语

长距离光纤油气管道预警监测系统中,采用相干瑞利散射分布式光纤传感系统光路有效降低现实中施工的难度;通过对 FPGA 采集模块和 DSP 模块设计,配合高速数据传输接口,既控制了硬件成本同时也降低了系统延迟,对系统实时预警起到了关键性作用;通过对软件系统上位机和下位机的设计,确定了程序稳定运行的能力;最后通过机械挖掘实验、打孔盗油实验和人工挖掘实验验证了系统的可行性,并具有较高的准确性。

参考文献:

- [1] 张叶浩,衣文索,崔光磊,等.干涉型光纤预警监测系统入侵信号的调制解调技术[J].吉林大学学报(信息科学版),2018,36(1):1-8.
- [2] 单媛媛.基于 Φ -OTDR 的分布式光纤振动传感系统关键技术研究[D].南京:南京大学,2019.
- [3] 叶贯宇,江毅.一种低成本的分布式光纤周界预警监测系统[J].仪表技术与传感器,2019(2):90-93.
- [4] 邵晓刚,宋茂忠. DSP 与 FPGA 异步数据传输方法 [J]. 电子设计工程,2017,25(21):27-29.
- [5] 桂桂,姚小兵,万宇鹏,等.基于 FPGA 和 DSP 的多参数现场噪声监测系统研究[J].中国测试,2017,43(5):110-114.
- [6] SHANG Ying, WANG Chen, WANG Chang, et al. Distributed vibration sensing of perimeter security based on space difference of Rayleigh backscatte [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(5): 129-134.
- [7] 陈建臣,余佩,王晓迪.基于 TITMS320C6678 DSP 的多核实时数据处理[J].数字通信世界,2017(8):81-82.
- [8] 朱程辉,赵益,王建平,等.光纤入侵行为融合特征的集成识别[J].光电工程,2016,43(12):6-12.