

管道微小泄漏检测数据采集系统的设计

王正锋,陈世利,郭世旭,黄新敬

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

摘 要:针对输油管道微小泄漏检测的特殊需求,以一种球形内检测器为载体,设计并实现了一套多传感器数据同步采集与存储系统,采用嵌入式 ARM-Linux 的方案。详细论述了该系统的整体结构、工作原理、硬件组成、软件设计等,并实验验证了该系统能准确地采集并保存所需要的信号,为后续准确识别和精确定位微小泄漏提供可靠的原始数据支持。

关键词:微小泄漏;内检测;数据采集存储;ARM;Linux

中图分类号:TP368;TH89

文献标识码:A

Design of a Data Acquisition System for Pipeline Tiny Leakage Detection

WANG Zhengfeng, CHEN Shili, GUO Shixu, HUANG Xinjing

(State Key Lab. of Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In consideration of the special needs for detection of tiny leakage on oil pipelines, a multi-sensor data acquisition and storage system is designed and implemented, with a spherical inner detector as its carrier. This system adopts an embedded ARM-Linux scheme. A detailed description of general principle, hardware components, software design and other elements of the system is represented. The experiment shows that the system can well capture and store signals detected, while it also supports the follow-up tiny leakage identifying and locating with reliable raw data.

Key words: tiny leakage; inner detection; data acquisition and storage; ARM; Linux

0 引言

目前管道泄漏检测方法根据检测过程中检测装置所处位置的不同可分为外检测法和内检测法^[1-2]。应用广泛的负压波法、声波相关法^[3]等管道外检测法仅能检测大于总流量1%的原油泄漏和大于总流量5%的天然气泄漏,而对微小泄漏检测却无能为力。管道内检测法则依靠内检测器从管道内靠近泄漏点监听泄漏信号,理论上能检测到很微小的油气泄漏。传统管道内检测器^[3](PIG)体积庞大,且与管壁紧密贴合,对管道变形敏感,存在很高的卡堵风险。

为了满足管道微小泄漏检测的迫切需求,本课题组创新性地提出了一种球形内检测器。该检测器在管道内流体的推动下滚动前进,沿途记录管道内泄漏声信号和定位信息,待检测结束由上位机分析处理,识别泄漏并对其定位^[4]。其球形载体外径小于管道内径,且是滚动前进,所以结构简单,不易卡

堵,噪声小,检测精度高。本文以该球形内检测器为载体,设计并实现了一套多传感器据同步采集与存储系统。该数据采集存储系统采用 ARM 处理器和嵌入式 Linux 操作系统的方案,同时搭载多种传感器器件与驱动电路,具有体积紧凑,功耗低,可靠性高及扩展性强等优点。

1 系统概述

该检测器的核心任务是在随油品运动的过程中完成对多种信号的同步采集并进行预处理,然后将数据存储起来,为后续的分析处理提供原始数据。为完成核心任务,该系统还具备电源管理、上电开机自检、数据下载、人机交互等功能。其整体结构如图1所示,核心部分是有多传感器和相关电路、电池组成的数据采集存储系统,其外是用于耐压、密封的铝合金壳体和其外包裹的减震、耐磨的聚氨酯外壳。在此结构中,将采集泄漏声音信号的水听器置于壳体外部,与管道内的液体介质直接接触,这种独特的

收稿日期:2013-08-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61240038)

作者简介:王正锋(1988-),男,山东临沂人,硕士生,主要从事管道泄漏检测技术及应用研究。陈世利(1974-),男,湖北鄂州人,副教授,硕士,主要从事油气管道内检测技术研究。E-mail: slchen@tju.edu.cn。

设计能增强对微弱的泄漏声音信号的采集效果。

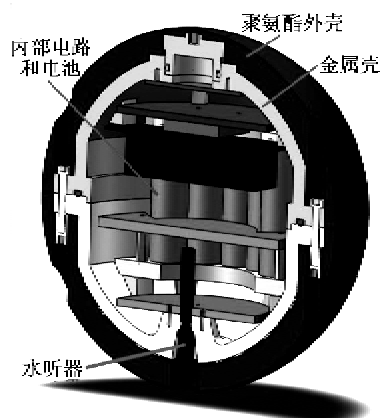


图1 检测器结构图

2 硬件设计

系统的硬件电路组成如图2所示,可充电的锂电池组经过电源模块转换成多种系统需要的工作电压给系统供电。各传感器采集的信号经预处理或模数转换通过多种协议将数据传输给处理器,处理器将数据以预定格式存储在大容量的TF卡中。待检测结束后,用户可选择通过USB接口或者网络接口将数据下载到PC机,并通过串口进行人机交互。

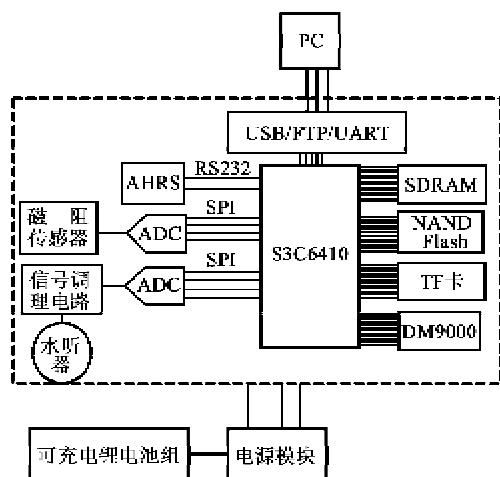


图2 系统硬件组成框图

2.1 处理器及相关外设

核心处理器选用 SAMSUNG 公司的基于 ARM1176JZF-S 内核的 S3C6410 处理器。其具有丰富的接口资源可供外围设备接入,既能满足目前检测的功能需求,更为以后器件设备的更换、扩展及功能的改善和增强提供强有力的支持。其外接 256M DDR400 RAM 及 256M NAND Flash 能满足系统文件存储和一定运算需要。处理器内部集成 USB 控制器,支持 USB2.0 协议,外接 DM9000 以

以太网控制器;将 USB-gadget 驱动及网卡设备驱动编译进内核,即可方便地利用网络或 USB 接口与 PC 机进行数据传输。另外,处理器内部集成了高速 MMC 控制器,直接外接 SD 物理层即可实现本地存储。

2.2 传感器及调理电路

检测器的核心任务是检测微小泄漏并对泄漏点进行定位。分别利用管道内声音信号识别泄漏,利用管道内磁场信号识别焊缝以定位泄漏。为了收集这些信息,经过广泛调研及考虑尺寸、装配工艺的限制,选择水听器和磁阻磁力仪作为传感器,并设计信号调理电路,以满足高灵敏度、低噪声的检测需求。

系统选用水听器采集声音信号。泄漏信号的频率范围约为 5 Hz~20 kHz^[5],且微小泄漏的声音强度很小。选用的水听器频响范围为 1 Hz~170 kHz,灵敏度很高(为 $-211 \text{ dB} \pm 3 \text{ dB re } 1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$),能确保采集到泄漏信号。另外,其尺寸小,可承受高达 10 MPa 的压强,能在高压的管道环境中工作。水听器输出的电荷信号经调理电路的处理得到一定范围内的电压信号,再进行模数转换成数字信号后存储。图3为信号调理电路的设计示意图。

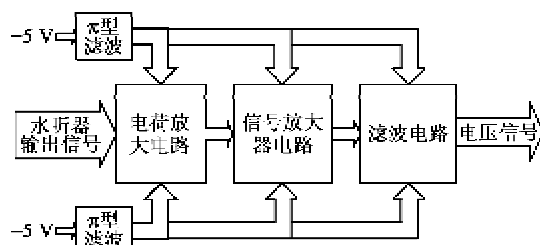


图3 声音信号调理电路框图

水听器输出的电荷信号经第一级电荷放大电路转换成电压,经过下一级的信号放大电路再次被放大,这一级的放大倍数可由人工调节。最后,经过滤波电路使一定频带内的信号保留下来进行后续的模数转换。

模数转换电路的核心芯片选用 ANALOG DEVICES 公司生产的 AD977A 芯片。该芯片为单通道,16 bit,200 K SPS;支持单、双极性输入,多种电压范围可选;内置 2.5 V 参考电压。转换后的数据通过三线 SPI 接口与 CPU 进行传输。S3C6410 内置的 SPI 控制器提供了多种功能强大的 SPI 操作模式及超高的传输速率,尤其是发送和接收模块的 64 字节缓存(FIFO),是实现高采样率模数转换的关

键。为满足实际需要,水听器部分的 ADC 采样率设为 100 kHz。

检测过程中还需采集三轴磁场信号,作为一种泄漏点的定位信息。本文选用霍尼韦尔公司的单轴磁阻传感器 HMR1001 和两轴的传感器 HMR1021 组合设计成三轴磁力仪。该传感器灵敏度很高,能感受到 $30 \times 10^{-10} \text{ T}$ 的磁场,且线性度好,线性误差仅为 1%,能很好地满足测量需求。其输出为 3 组差分模拟信号,需经 A/D 转换成数字量。ADC 选用另一款芯片 AD7193,该芯片为超低噪,4 通道差分输入,24 bit,4.8 K SPS,并且内置序列器;与 CPU 通过 3 线 SPI 接口连接。这样设计的磁传感器模块具有体积小,灵敏度高,且可由软件灵活地调整采样率。

另外,系统还需多种姿态信息用来还原检测器运动姿态,辅助泄漏点定位。检测器运动姿态的加速度、速度、欧拉角等信息以数字量的形式输出,通过 RS232 协议与 CPU 进行通信。

2.3 电源管理模块

系统的电源管理是保证检测顺利进行的關鍵。电源管理模块的设计如图 4 所示。

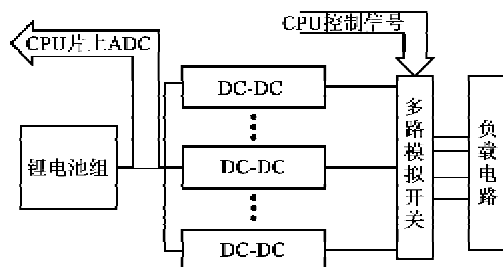


图4 电源管理模块框图

整个数据采集系统由可充电锂电池供电。内部电路工作需多种电压,由电池电压经转换得到。与此同时,CPU 通过内嵌的 ADC 采集电池电压,对其进行实时监测,并与软件中设置的安全电压阈值相比。每种工作电压的负载电流都不超过 500 mA,所以使用多路模拟开关,由 CPU 根据电池电压的状况发出控制信号控制其通断,以便在不同的工作条件下合理地支配各功能模块的供电,降低功耗,保证系统长时间安全可靠地运行。

3 软件设计

ARM 处理器上移植有嵌入式 Linux 操作系统。软件部分设计的主要内容是 Linux 内核的裁剪和移植,ADC 驱动模块的设计以及控制系统工作的

应用程序设计。

操作系统的内核裁剪采用条件编译内核裁剪的方式,利用 Linux 自带的配置编译工具,根据处理器的硬件资源和检测的应用需求,保留了内核的常用接口、USB、网络、文件系统、SD 卡等必要的功能模块,去掉不必要的模块,实现内核的定制。这样可合理分配系统资源,降低系统的功耗。

3.1 ADC 驱动程序设计

根据第 2.2 节的介绍可知,有两种传感器的输出需进行模数转换。其所用的 ADC 芯片虽然不同,但其操作方式和工作流程相似,所以两种芯片的驱动程序设计思路及实现的功能大致相同:通过 ARM 内置的脉冲宽度调制(PWM)定时器产生固定频率的方波信号,触发 ADC 的采集转换;每次转换完成后,芯片发出的指示信号触发 ARM 的外部中断,在中断服务程序中通过 SPI 接口读取转换结果到缓存;在几个接口函数中将数据拷贝到用户空间^[6],供用户处理,并能设置 ADC 的工作参数等。其中几个主要的接口函数功能如下:

1) ADXXXX_open()。该函数对设备进行初始化,首先将 CPU 内部寄存器的物理地址映射为 Linux 内核的虚拟地址,这样可通过访问虚拟地址来读写各寄存器,进而配置 PWM 定时器的初始参数,SPI 相关参数等。

2) ADXXXX_write()。本检测器中该函数主要实现 PWM 定时器的开关,以控制模数转换的开启和关闭。

3) ADXXXX_read()。将内核态缓存的数据拷贝到用户态,并返回给应用程序。

4) ADXXXX_ioctl()。改变工作参数,如 ADC 的采样率,SPI 缓存触发中断的阈值,串行外设接口(SPI)波特率及转换数据的输出格式是原始的二进制数还是二进制补码等。

3.2 应用程序设计

应用程序实现的主要功能有系统的开机自检和运行过程中对多种信号的同步采集和存储。本文采用多线程的编程方式,此方式可采用共享变量的方式完成线程间通信,节省系统调用的开销,执行效率更高。应用程序的流程如图 5 所示。

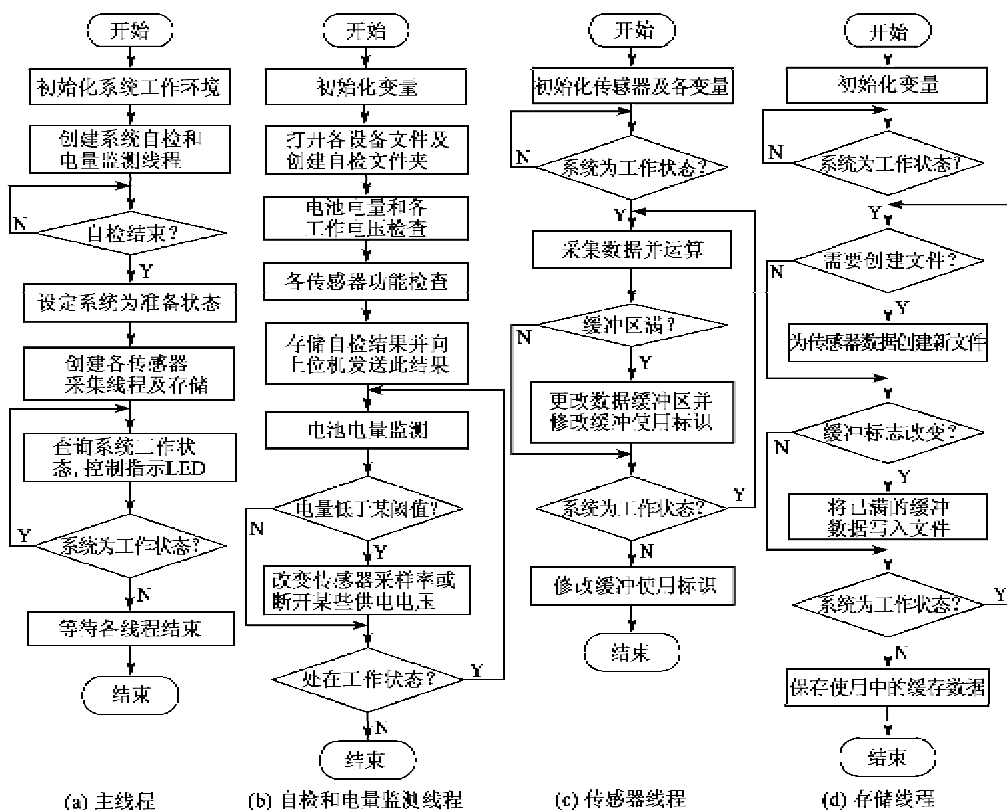


图5 应用程序流程图

应用程序主要包含主线程、自检及电量监测线程、各传感器线程、存储线程4种不同功能的线程。主线程在初始化环境变量后,创建其他线程,并一直查询系统的工作状态,控制指示灯的动作。

自检线程是除主线程外最先开始执行的线程,会对电池的电量和各种工作电压及各传感器的功能进行检查,自检结束后将自检结果以日志形式存储起来。然后发送给上位机的人机交互程序,展示出自检信息,可在检测器正式工作前告知用户检测器内部功能正常,准备工作;或是在电量不足时提醒用户充电,在某个功能模块出现问题时提醒及时检修。

在传感器线程中,每个传感器根据自身信号的采样率申请两个全局可见的缓冲区,交替使用,并通过缓冲区使用标识符标记当前使用的缓冲区。传感器线程与存储线程共享缓冲区及使用标识符。存储线程中根据缓冲使用标识,以开始采集时间为文件名,将已满的缓冲区中的数据保存到相应的文件夹中。这种数据共享结构优势是线程间数据交换方便,资源开销小,存储线程可快速访问、及时保存数据,有效地降低数据遗漏的可能。

在上述多线程并发程序设计中,所有线程都能访问其中的全局变量,因此需保证线程间的同步,该

系统使用互斥量实现对共享数据进行独占式访问。程序设计中所有线程在对工作状态、缓冲区使用标识符和各传感器数据缓冲区等全局变量进行访问前,必须获取相应的互斥量,由此实现数据保护、线程同步^[7]。

4 性能测试

将该系统组装在球形内检测器中,在一段长6 m的实验管道中滚动,采集管道中的三轴地磁场信号,实验现场如图6所示。



图6 管道内滚动实验图

图7为一段采集到的磁场信号波形。由图可知,三轴磁场信号及总的磁场呈周期性变化,对应检测器绕某一方向滚动的运动姿态,信号的一个周期对应检测器滚动一圈,其中出现的峰值畸变对应管

道的焊缝连接处,该信息对后续的泄漏点定位至关重要。同时总磁场强度的平均值为 $50 \sim 60 \mu\text{T}$,符合地磁场大小的理论值。信号很光滑,噪声很小。

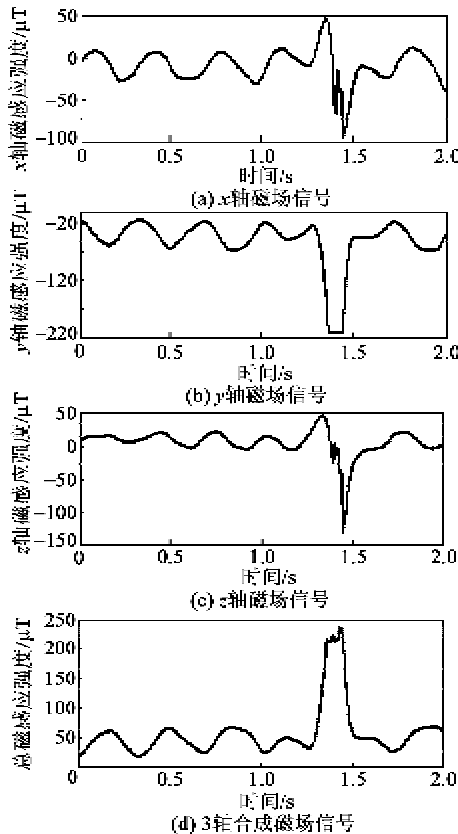


图7 磁场信号波形图

为了验证水听器外置液体中对微小泄漏信号的采集效果,将检测器置于实验管道中,进行模拟微小泄漏的信号采集实验。实验环境如图8所示。管道成封闭状态,并充满水,用智能调压水泵给其施加一定的压力,对应实际输油管道的输送压强;以一定孔径的堵头,模拟管道的泄漏点,在一定压力下,形成泄漏。实验中用的堵头孔径为 $\varnothing 0.4 \text{ mm}$,调节压强为 0.5 MPa 、 0.7 MPa 和 1 MPa ,经流量计读取泄漏量分别为 0.2 L/min 、 0.24 L/min 和 0.3 L/min 。

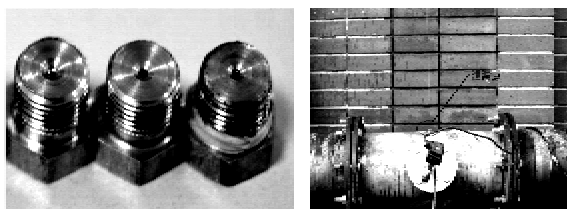


图8 模拟泄漏实验场景图

图9为不同压力下采集到信号的时域和频域图。由图可知,泄漏信号处在一个很宽的频带范围内,幅值随着压力的增大而增大,对应实际的泄漏量

增大,其产生的声压也会增强。该实验证明系统可在泄漏量很小的情况下采集到泄漏信息。

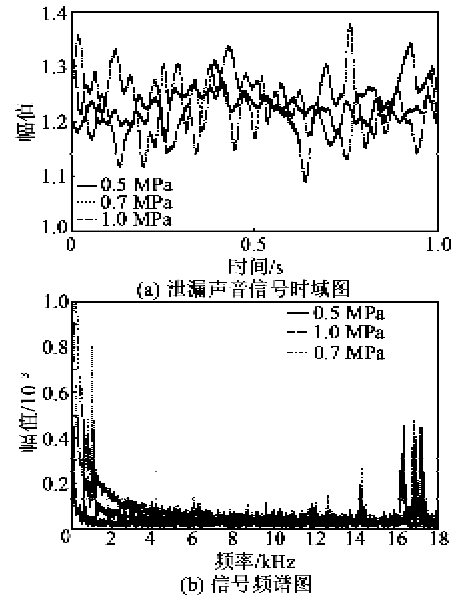


图9 泄漏信号波形图

5 结束语

本文设计了一种用于检测管道微小泄漏的数据采集存储系统,采用嵌入式 ARM-Linux 方案,能实现多传感器数据的同步采集存储,并具有电源管理及自检功能,对设计的采集存储系统进行了相关性能测试实验,表明该系统在水声信号及微弱磁场信号的采集方面具有较高的灵敏度,能准确采集并存储数据,符合所设计的微小泄漏球形内检测器的检测需求,具有低功耗,低成本,灵活性好等特点,能为管道微小泄漏检测提供准确的原始信号。

参考文献:

- [1] 李莺莺. 油气管道在线内检测技术若干关键问题研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [2] 王效东, 黄坤, 朱小华, 等. 油气管道泄漏检测技术发展现状[J]. 石油机械, 2008, 6(1): 24-26.
WANG Xiaodong, HUANG Kun, ZHU Xiaohua, et al. Present state of the development of oil-gas pipelines leak-detection technologies[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2008, 6(1): 24-26.
- [3] 周燕, 董怀英, 周志刚, 等. 油气管道内检测技术的发展[J]. 石油机械, 2011, 39(3): 74-77.
ZHOU Yan, DONG Huaiying, ZHOU Zhigang, et al. Development of oil-gas pipelines inner-detection technologies[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(3): 74-77.

(下转第 571 页)