

振动传感器智能化的研究与实现

李建其^{1,2}, 朱杰³, 郭涛^{1,2}

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051;

2. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051; 3. 北华航天工业学院, 河北 廊坊 065000)

摘要: 在测控领域内, 随着传感器技术和微处理器技术的发展, 对传感器的精确度、可靠性要求越来越高, 要求传感器具有一定的数据处理、自我检测、自我纠错能力, 并且具有数据通信和扩展组网功能; 为了满足这个要求, 文章提出了一种基于 CAN 总线技术的振动传感器智能化方案, 详细介绍了智能传感器节点硬件电路和固件程序设计的具体实现; 对智能节点进行静态和动态测试, 静态环境下传感器电压值输出为 2.5 V, 上位机对数据处理后作图, 符合实际要求; 动态环境下, 将传感器置于连续振动环境, 数字量数据接收后经处理作图, 与标准传感器波形图进行比较, 满足设计要求。

关键词: CAN 总线; 振动传感器; C8051F500; 智能化; 自校准

Research and Implementation of Intelligent Vibration Sensor

Li Jianqi^{1,2}, Zhu Jie³, Guo Tao^{1,2}

(1. Ministerial Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. State Key Lab. of Science and Technology on Electronic Test & Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China; 3. North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China)

Abstract: With the development of sensor technology and microprocessor technology, the accuracy and reliability of sensor have been becoming more and more significant in the field of measurement and control. The sensor, equipping with certain data processing, self-testing and self-correcting capability, can communicate with other nodes in the network. To meet this requirement, the paper proposes a solution of intelligent vibration sensor based on Controller Area Network and details the implementation of circuit and firmware for digital node. Test the sensor node in static and dynamic environment. The output voltage of the sensor for the static environment is 2.5 V. PC plots the chart after data processing, which is in line with actual requirements; In dynamic test, the sensor is placed in continuous vibration environment, the chart plotted by PC after data processing meets the design requirements, comparing waveforms to the standard sensor.

Keywords: CAN bus; vibration sensor; C8051F500; intelligent; self-calibration

0 引言

传感器智能化是以嵌入式微处理器为核心控制单元, 集成了信息采集单元、信号处理单元和通信接口单元, 使传感器具备自纠错、自校准、自诊断及数据通信功能, 从而实现信息的采集、处理和传输真正统一协调的新型信号采集和传输方法^[1]。

CAN 是控制器局域网 (controller area network) 的简称, 它属于现场总线的范畴, 是一种有效支持分布式控制或实时控制的串行通信网络, 具有高性能、高可靠性、易开发和低成本等优点, 其已经广泛应用于工业自动化, 农用机械, 航空航天, 医疗仪器等众多领域^[2]。本文提出了一种基于 CAN 总线的振动传感器智能化的设计方案, 以加速度敏感头作为信息采集单元, 以内部温度传感器为标准, 采用二元插值法完成加速度计信号的校准, 以 CAN2.0 协议的形式完成数据的发送和

接收, 实现具有高精度、强电磁干扰、高可靠性的智能振动传感器节点。

1 节点总体设计

通常, 由普通微处理器、AD 转换芯片、外部温度传感器、CAN 控制器、CAN 收发器以及相应的外围电路来实现智能化。由于对振动测试装置小型化、轻量化、低功耗、可靠性高的要求, 本设计采用新华龙公司的完全集成的混合片上系统型 MCU——C8051F500 为控制核心, 利用内部高精度, 高转换速率的 12 位 ADC 完成模拟量到数字量的转换, 利用内部温度传感器, 为加速度传感器的温度补偿提供依据, 利用内部集成兼容 CAN2.0A 和 CAN2.0B 协议的 CAN 控制器和外部 CAN 收发器 TJA1050TD 完成数据的发送和接收^[3]。这样减小了整个节点的体积和重量, 降低了节点工作时的电量消耗, 并且减少了工作时器件出错的概率。节点整体框图如图 1。

2 硬件设计

硬件电路采用以 51 为内核的 C8051F500 微处理器作为控制核心, 配以信号调理电路、CAN 总线接口电路、复位电路等外设电路实现。工作原理为: C8051F500 为控制核心, 控制前端采集电路完成信号采集, 得到模拟量数据, 之后经过内部 12 位 ADC 进行模拟量到数字量的转换, 得到数字量数据, 由

收稿日期: 2014-05-06; 修回日期: 2014-07-08。

基金项目: 国家自然科学基金(50730009; 51075374)。

作者简介: 李建其(1990-), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 主要从事智能传感器网络方向的研究。

郭涛(1971-), 男, 山西翼城人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事 MEMS 器件系统方向的研究。

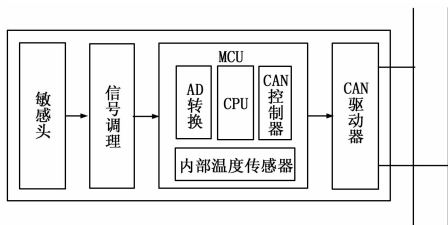


图 1 总体框图

MCU 完成对数字量数据的处理, 之后由控制内部集成的 CAN 控制核, 对数字量数据进行编码, 按照 CAN 协议的数据帧格式传送给 CAN 驱动器 TJA1050TD, 通过 TJA1050TD 完成与 CAN 总线信息的交互。

2.1 信号调理电路

敏感头输出信号一般比较微弱, 需要对其进行放大, 以符合 ADC 可以处理的电压范围^[4]。对于不同频率的振动信号, 传感器的频响不同, 该传感器的频响范围为 2 Hz~1 kHz, 所以对于频率高于 1 kHz 的振动信号和高频噪声信号, 应当尽量滤除掉, 以免对有用信号造成干扰。图中 C1, R6, C2, R2 组成二阶低通滤波电路, 完成对 1 kHz 以上信号的衰减; C3, C4, C5, C6 四个电容分别保证 TL4581 电源供电稳定; 后端采用 TL4581 构成一个电压跟随器, 其具有较高的输入电阻和较低的输出电阻。在振动过程中, 加速度为正向时产生正电压, 经放大后电压范围在 0~2 V 之间; 加速度为反向时产生负电压, 经放大后电压范围在 -2~0 V 之间。为了匹配 ADC 可处理的电压范围, 由 R1 和 LM236 构成一个稳定的 2.5 V 电压偏置电路, 把输出信号抬高到 0~5 V 之间。为了避免因输出电压幅值过大, 而对 ADC 造成不可恢复性损坏, 在输出端增加一个 5.6 V 的稳压管 D1。加速度信号调理硬件电路如图 2。

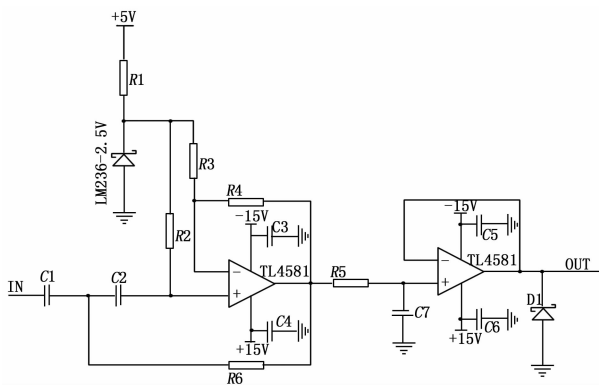


图 2 信号调理电路原理图

2.2 CAN 总线接口设计

C8051F500 内部带有 CAN 控制器, 主要完成 CAN 的通讯协议, 实现报文的装配和拆分、接收信息的过滤和校验等。只需要外接一片 CAN 总线驱动器 TJA1050TD, 即可共同组成一个 CAN 总线通讯结构, 完成与 CAN 总线的信息交互。CAN 总线的信号传输线仅为两条, 即 CANH 和 CANL, 以差分信号形式来表示数字逻辑信号, 静态时均为 2.5 V 左右, 此时状态表示为逻辑 ‘1’, 称作隐形; 用 CANH 比 CANL 高表

示逻辑 ‘0’, 称为显性^[5]。在实际总线系统, 节点会受到多种形式的干扰, 包括电源干扰、地线干扰、信号串扰、空间电磁干扰及静电干扰等。针对电源干扰, 引入 DC-DC 电源模块 DCP020505, 使得总线电源和控制系统电源隔离, 提高可靠性。采用高速光耦 HCPL0600 来实现收发器 TJA1050TD 和主控制器 C8051F500 之间的电气隔离, 保护控制系统电路。TJA1050TD 可增强对总线的差分接收、发送能力, 具有抗瞬间干扰、保护总线的能力, 能满足 1 Mbps 的传输速度要求, 为防止波形反射, 保证通信的可靠性, CANH、CANL 之间需接阻值为 120 Ω 左右的电阻作为线路的匹配电阻^[6], 保证总线的正常通讯, CAN 总线接口电路原理如图 3。

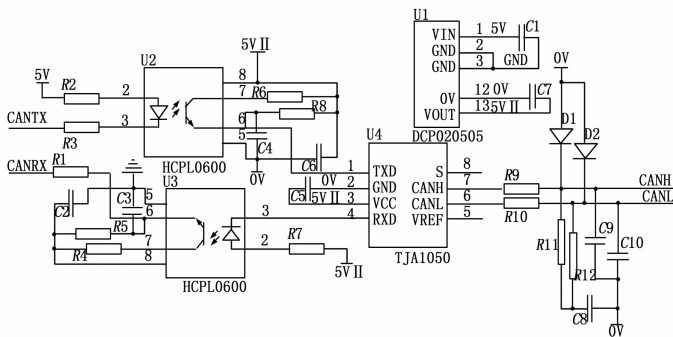


图 3 CAN 总线接口电路原理图

3 软件设计

振动传感器智能化中的软件部分设计, 主要实现模拟量数据到数字量数据的转换、数字量数据的处理和数字量数据以 CAN 协议的标准帧格式的发送和接收。为了完成智能化任务, 其固件程序设计采用模块化设计思想, 主要包括以下几个部分: 初始化模块, 主处理模块, 数据采集模块, 数据校准模块, CAN 消息发送模块, CAN 消息接收模块。

3.1 初始化模块

在系统自动上电复位后, 单片机中的寄存器中的值处于原始状态, 为了保证按照系统要求完成预定设置, 需要进行初始化, 包括系统时钟初始化配置, IO 端口初始化, 定时器 2 初始化, 初始化配置内部模数转换器, CAN 寄存器初始化。

3.2 数据采集和校准模块

为依照 CAN2.0A 协议发送数据, 必须将采集得到的模拟信号转换为数字信号, 为减小传感器体积, 节省 PCB 板空间, 转换采用 C8051F500 单片机内部集成的 12 位 ADC, 参考电压选用内部偏置电压源提供的 2.20 V 的直流电压。由于采样电压范围为 0~5 V, 而参考电压仅仅为 2.20 V, 所以在 AD 采样的前端增加一个 0.44 的输入增益。为提高采样精度, 选择采样方式为 Timer2 溢出触发 AD 转换, 以 Timer2 的计时时间来作为 ADC 的采样周期。

加速度计是利用单晶硅材料的压阻效应制成的^[7]。而单晶硅作为半导体材料, 传感器对温度变化比较敏感, 如不采用温度补偿, 就会受到较大的温度漂移误差影响^[8]。温度补偿分为硬件补偿和软件补偿两种方法。软件补偿技术实现相对简单, 补偿效果明显, 是提高压阻式传感器精度的重要途径^[9]。本设计采用二元插值法对加速度计采集出的数据进行校正, 其中敏感头的输出是 g 值和环境温度 T 共同决定的二元函数, 它可

以表示为:

$$U = f(g, T) \tag{1}$$

插值校正是根据公式 (1), 用反向插值的方法, 在已知温度 T 和测量结果 U 的情况下, 求解被测 g 值的大小^[10]。当完成信号采集后, MCU 读取内部温度传感器的值, 得到当前的环境温度 T , 根据采集到的电压值 U 和温度 T , 参考存储在 MCU 内部的插值表, 得出当前测量到的 g 值, 存入发送数据缓存。数据采集和校准流程图如图 4。

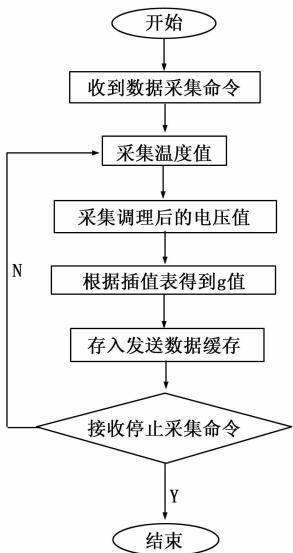


图 4 数据采集和校准流程图

3.3 CAN 通信模块

CAN2.0A 协议中, 一帧数据帧可以发送 8 个字节的数 据。当发送数据缓存的数据存满 8 个字节后, 调用 CAN 消息发送函数, 将初始化配置的发送消息对象的消息号写入命令请求寄存器, CPU 控制完成 IFX 寄存器和消息对象 RAM 的交换, 由 CAN 核完成数据到 CAN 总线上的发送任务^[11]。当数据成功发送到 CAN 总线上, 并且成功的被其他节点接收后, 会引发 CAN 发送中断, 从而告知 CPU 数据帧发送完成。

当总线上有数据传输时, 节点会把总线上的数据存入消息 RAM 中, 之后根据初始配置中接收消息对象的 ID 号, 对总线上数据中的 ID 号进行滤波, 如果匹配, 触发接收中断, CPU 控制将消息从消息 RAM 中存入 IFX 寄存器中, 完成数据的接收。若接收的数据为开始采集命令, 则 CPU 开始进行 AD 转换和数字量数据的发送; 若接收的数据为停止采集命令, 则 CPU 关闭 ADC, 停止信号的采集。CAN 通信模块流程图如图 5。

4 测试结果

该智能节点传输到 CAN 总线上的数据, 通过 CAN-USB 转换卡传输给上位机, 上位机对接收到的数据进行处理和显示。在无振动环境下, 传感器输出模拟电压值 (零位值) 为 2.5 V, 此时智能节点进行采集得到的是零位电压, 上位机接收智能节点上传的数据为零位电压对应的 12 位数字量值。在连续振动的环境下, 敏感头输出电压信号, 经过调理、采集、校准后, 得到对应的 g 值数字量, 上位机接收到节点上传的数据, 将数据处理后作图, 将智能节点输出波形和标准传感器输

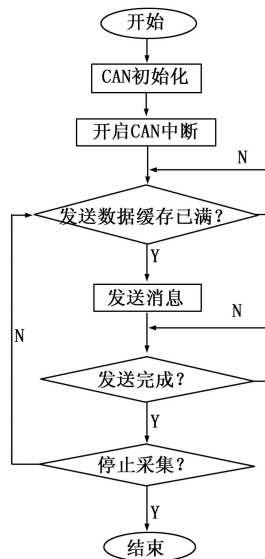


图 5 CAN 通信流程图

出波形进行对比, 显示结果如图 6。实验结果显示: 通信过程中各种指令和数据传输稳定、准确, 满足本次设计的初衷。

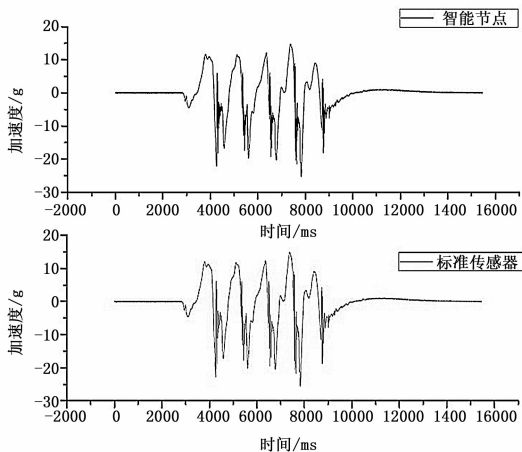


图 6 智能节点振动测试结果图

5 结束语

智能节点使用了内嵌 ADC、温度传感器和 CAN 核的 C8051F500 单片机, 避免独立 ADC、外部温度传感器和独立 CAN 控制器的接入, 使得硬件电路得以简化, 减小了系统的内部噪声, 智能节点的小型化、轻型化得以实现, 提高了节点的可靠性。CAN 总线采用通信数据块编码方式, 数据传输速率高达 1 Mbit/s, 大大加快了信息传输的效率, 有助于提高系统的实时性。CAN 总线具备识别永久故障、短暂扰动的自检机制和 CRC 校验功能, 抗干扰性能和错误检测性能表现突出, 使节点的可靠性进一步提高。

参考文献:

[1] 景 博. 智能网络传感器与无线传感器网络 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

当 ERTOS 处于空闲状态时, 系统会根据需要直接进入休眠状态。无线传感器网络节点在多数时间处于空闲状态, 因此, ERTOS 能够有效降低系统功耗。

3.2 实时性分析

ERTOS 是抢占式的嵌入式实时操作系统, 高优先级任务可以优先执行, 并且优先级较高的任务可以抢占优先级较低的任务执行的机会, 抢占式调度和单线程调度的实时性比较如图 6~7 所示。

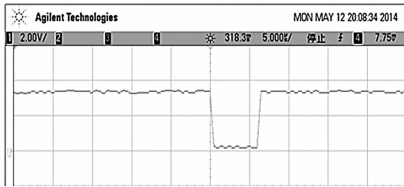


图6 抢占式调度实时性分析

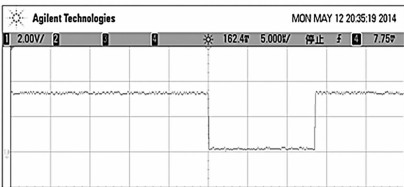


图7 单线程调度实时性分析

分别创建任务 A 和任务 B, 任务 A 处于低优先级, 任务 B 处于高优先级。图 6 中, 下降沿表示任务 A 开始执行, 上升沿表示任务 B 开始执行。系统启动后, 由系统挂载任务 A, 并在任务 A 中挂载任务 B。图 6 (a) 采用抢占式的实时调度, 在任务 A 中挂载任务 B 后, 任务 B 由于拥有更高的优先级而立即被调度执行, 图 6 (b) 采用单线程的调度机制, 高优先级任务 B 必须等待低优先级任务 A 先执行完, 才能被执行。图 6 (b) 中, 任务 B 的执行比图 6 (a) 中推迟约 $10 \mu\text{s}$, 并且, 随着任务 A 复杂度的增加, 任务 B 将进一步被推迟。实验表明, ERTOS 的抢占式调度机制, 有助于提高系统的实时性。

4 应用实例

将 ERTOS 应用于以 STM32F103 为硬件核心的移动无线

传感器网络节点中, 承担节点中各应用程序的调度任务, 移动无线传感器网络节点被安装到一个由电机驱动的可移动小车上, 软件部分主要包括 GPS 数据解析任务、通信任务、传感数据处理任务和电机控制任务, GPS 数据解析任务和传感数据处理任务通过软件事件触发通信任务。测试结果表明, ERTOS 操作系统功耗低、实时性好且运行稳定。

5 结论

基于事件驱动的嵌入式操作系统 ERTOS, 采用分层结构的思想设计了抽象层、核心层和应用层, 提高了系统的可移植性; 采用内存控制块链表, 实现了简易高效的内存管理; 基于事件驱动和任务优先级, 实现了可抢占的任务调度。

将 ERTOS 应用到移动无线传感器网络节点上, 系统运行稳定, 实时性好, 功耗低。

参考文献:

- [1] 张 昊, 崔永俊, 沈三民, 等. 基于 CAN 总线的传感器网络设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (11): 3103-3105.
- [2] 周海鹰, 左德承, 李 剑, 等. 基于混杂模式的无线传感器网络操作系统的设计 [J]. 高技术通讯, 2013, 23 (2): 130-138.
- [3] Buttazzo G C, Bertogna M, Yao G. Limited preemptive scheduling for real-time systems. a survey [J]. Industrial Informatics, IEEE Transactions on, 2013, 9 (1): 3-15.
- [4] Farooq M O, Kunz T. Operating systems for wireless sensor networks: A survey [J]. Sensors, 2011, 11 (6): 5900-5930.
- [5] Bhatti S, Carlson J, Dai H, et al. MANTIS OS: An embedded multithreaded operating system for wireless micro sensor platforms [J]. Mobile Networks and Applications, 2005, 10 (4): 563-579.
- [6] Levis P, Madden S, Polastre J, et al. TinyOS: An operating system for sensor networks [M]. Ambient intelligence. Springer Berlin Heidelberg, 2005: 115-148.
- [7] Labrosse J J. MicroC/OS-II: The Real Time Kernel [M]. CRC Press, 2002.
- [8] Shan-shan M, Jian-sheng Q. Energy Balanced Non-Uniform Distribution Node Scheduling Algorithm for Wireless Sensor Networks [J]. Applied Mathematics & Information Sciences, 2014, 8 (4).
- [9] Comer D. Operating System Design: The XINU Approach, Linksys Version [M]. CRC Press, 2011.
- [10] Cormen T H, Leiserson C E, Rivest R L, et al. Introduction to algorithms [M]. Cambridge: MIT press, 2009.

(上接第 319 页)

- [2] 张培仁, 杜洪亮. CAN 现场总线监控系统原理和应用设计 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2011.
- [3] 李文燕, 郭 涛, 徐香菊. MEMS 高量程微加速度计温度补偿的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (10): 2857-2859.
- [4] 王 祁. 传感器信息处理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [5] 牛跃昕, 周立功, 方 丹. CAN 总线嵌入式开发——从入门到实战 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
- [6] 杨春杰, 王曙光. CAN 总线技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.

- [7] 郭 涛, 鲍爱达. 一种压阻式硅微复合量程加速度计 [J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30 (6): 186-189.
- [8] 王世清, 姜 彤, 侯占民. 单晶硅压力传感器温度漂移的补偿方法 [J]. 传感器与微系统, 2006, 25 (7): 33-35.
- [9] 孙艳梅. 压阻式压力传感器温度补偿方法研究 [D]. 齐齐哈尔: 齐齐哈尔大学, 2012.
- [10] 刘 鹏. 压阻式压力传感器温度补偿方法实现的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [11] 张培仁. CAN 总线设计及分布式控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.