

基于 AD7791 的磁通门传感器数据采集与存储系统

李松鹤, 曹大平

(武汉大学 物理科学与技术学院, 武汉 430072)

摘要: 针对磁通门传感器检测到的多路弱磁信号, 设计了一种以 AD7791 为采集核心的小信号采集系统, 解决了 6 路 AD 采集的同步问题; 以 MSP430F5437 超低功耗单片机为主控, 运用无磁转台测试实验, 实现了数据的存储和探头姿态的校正, 后采用最小二乘法进行数据修正; 经实验验证, 该采集系统可稳定于野外长时间工作 (半年以上), 零点稳定度由 1.7 nT/h、2.4 nT/h、1.4 nT/h (XYZ 三轴) 下降到 0.2 nT/h、0.31 nT/h、0.23 nT/h, 采集精度 (参考地磁场 49535nT) 由 49516nT 下降到 49534nT; 有效地降低了系统测量误差, 精度明显提高。

关键词: 数据采集; 磁通门; AD7791; 高精度; 低功耗

Data Acquisition and Storage System of Magnetic Fluxgate Sensor Based on AD7791

Li Songhe, Cao Daping

(School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A small signal acquisition system based on AD7791 is designed to solve the multiple weak magnetic signals detected by the magnetic flux-gate sensor, which solves the problem of the synchronization of the six channel AD acquisition. MSP430F5437 ultra low power microcontroller act as based control, the use of non magnetic turntable test experiment, to achieve the data storage and probe attitude correction, and using the least square method for data correction. After experimental verification, the system can be stable in the field work for a long time (more than half year), zero stability by 1.7 nT/h, 2.4 nT/h, 1.4 nT/h (XYZ three axis) dropped to 0.2 nT/h, 0.31 nT/h, 0.23 nT/h, acquisition accuracy (reference field 49535nT) decreased from 49516nT to 49534nT. Effectively reduce the system measurement error, and the accuracy is obviously improved.

Keywords: data acquisition; flux-gate; AD7791; high-precision; low power consumption

0 引言

磁通门传感器是一种利用坡莫合金等软磁材料, 通过磁化饱和时的非线性, 来测量外部弱磁场的传感器^[1]。与其他类型测磁仪器相比, 磁通门传感器具有分辨率高、测磁范围宽、稳定可靠、能够直接测量磁场的分量和适于在运动系统中使用等特点^[2]。

这种磁敏传感器的最大特点是适合在零磁场附近工作的弱磁场进行测量。传感器可作成体积小, 重量轻、功耗低, 由于该测磁仪对使用方便, 故已较普遍地应用于航空、地面、测井等方面的磁法勘探工作中, 在军事上, 也可用于寻找地下武器 (炮弹、地雷等) 和反潜。还可用于预报天然地震及空间磁测等。

1 系统结构及原理

本文设计的磁通门传感器数据采集系统研制的背景是基于野外无人值守环境, 提出了如下要求:

1) 续航时间尽可能长, 总体功耗要小, 野外工作时采用电池供电。

2) 总体体积小、集成度高, 便于将设备内嵌, 主控芯片

集成多种片外资源。

3) 采集速度快、精度高, 可以存储复杂解析算法。

基于以上, 控制单元采用德州仪器的 MSP430F5 系列超低功耗单片机, 内部集成有 SPI 和 IIC 通信模块, 无需单独添加片外资源; 地磁场通常为 47500 nT (纳特, 磁感应强度单位) 左右, 传感器输出分辨率为 0.2 nT, 这样对前端 A/D 采样精度提出了极高的要求。通过噪声分析、功耗分析、分辨率分析、综合选取 AD7791 为采集核心; 后端移植 Fats 文件系统; 合并 DS3231 时钟芯片接收到的时间, 将数据实时刷新到存储卡上, 满足野外高精度数据持续记录的要求。数据采集存储系统总体如图 1 所示。

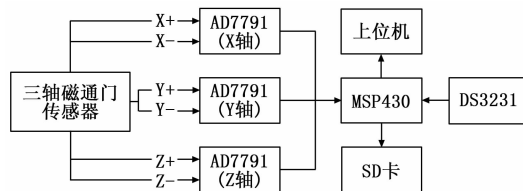


图 1 系统总体框图

2 硬件设计

系统采用 MGA 系列磁通门传感器, 结合 MSP430F5437 单片机, 采用 24 位高精度 A/D 转换器对 3 个方向、6 路分量进行同步信号采集; 由于传感器输出有多种电压型号, 有 5 V 输出和 3 V 输出两个版本, 为了提高系统兼容性, 增加了逻辑电平转换模块, 使得通用性更强。图 2 为系统电路接线图 (单路)。

收稿日期:2017-01-02; 修回日期:2017-02-16。

基金项目:国家自然科学基金项目(41274188)。

作者简介:李松鹤(1988-),男,硕士,主要从事磁通门传感器方向的研究。

曹大平(1961-),教授,博士生导师,主要从事弱磁场测量方向的研究。

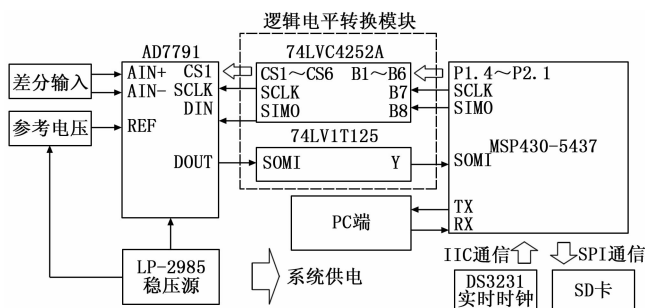


图 2 单路采集电路

2.1 差分输入设计

A/D 转换器模拟输入部分采用差分方式³，每一路输入信号都有自有基准地线，共模噪声被导线消除，减少了噪声误差，增强了抗干扰能力，特别是在磁通门传感器动态输出弱电压信号并有低频噪声的情况下，通过 0.1 μF 和 10 μF 电容多次滤波，达到了在特定频带内（0~4 Hz）减少输出误差的作用。

2.2 主控芯片

MSP430F5437 是一款超低功耗单片机，其主要优点是：采用 16 位 RISC 精简指令集、外接 25 M 晶振、指令周期达到 40 ns、运行速度快、大容量 Flash 和 RAM，适合存储运行复杂算法。硬件上包含一个看门狗定时器，防止程序跑飞；两个普通定时器，UART 通用串口，定时与上位机交换数据；多路 SPI 和 IIC 通信模块，用于适配 DS3231 时钟芯片和外部存储卡。时钟源 ACLK/SCLK 可以选择性关闭或打开，极大地节约了功耗。

2.3 A/D 转换电路

三轴磁通门传感器将弱磁场量化并输出线性模拟电压，需要通过 A/D 芯片转换成相应的数字量进行后续数据修正分析^[4]。

理想情况下，分辨率越高越好、功耗越低越好；同时考虑到 AD 转换器噪声不能淹没前端磁通门传感器噪声，综合以上参考条件，选择 ADI 公司的 AD7791 芯片^[5]。前端 0~70000 nT 的测量范围对应 40 μV/nT 的分辨率，24 位的 AD7791 分辨率约为 0.18 μV/nT；电压噪声级别小于 0.4 μV/√Hz（at 1 Hz），最大功耗 75 μA，完全满足以上要求，不仅如此，串行 SPI 通信模式较好地利用了主控芯片的外设，使得电路设计简单^[6]。

2.4 逻辑电平转换模块

磁通门传感器有 5 V 和 3 V 两种不同型号输出，MSP430 的最大耐受电压是 3.6 V，不可直接连接，为了保持兼容性，必须通过逻辑电平转换。AD7791 将量化后的数字量通过 SPI 模块串口通信，选择 74LVC4252A 和 74LV1T125 两款低功耗芯片，能够很好地完成设计要求。

2.5 实时时钟

磁场的测量不仅要求准确度高，还要求具有实时性、可追溯性，能够精确的记录具体某个时间下的量值。MSP430 内部集成有 RTC 时钟模块，但考虑到计时精度和断电情况，不符合系统要求，因此必须选择外部扩展实时时钟。

DS3231 是一款集成 IIC 通信的时钟芯片，通过外部电池供电，具有低成本、高精度的特性。芯片内部集成了晶体振荡器和温度补偿传感器，不但减少了元件的数量，还确保了器件的长期精确性。该芯片采用的是 16 引脚封装形式，以 IIC 协

议与微控制器进行通信，利用协议的双向总线传输数据和地址作为高精度时钟芯片，正常电压工作时，年误差不大于 2 分钟，闰年自动补偿。

2.6 外部存储模块

测量设备在野外通常是几个小时甚至数天的不间断工作，采集的数据量很大，而 MSP430 单片机内部的存储器显然无法满足要求。为实现野外无人看守条件下的大容量数据存储，需要外接一个存储模块。目前存储模块有多种，而系统设计的目标是体积小、功耗低、容量大，最适合采用的是 SD 卡，目前已经可以做到 32 G 甚至 64 G 以上，而且支持 SPI 接口，和 MSP430 单片机能够很好的兼容。在物理介质的基础上，还需要一定的格式保证数据能够可靠的存储和读取，跨平台的 Fats 文件系统能够很好地满足要求。

3 软件设计

系统使用 CCS5.0 集成开发环境，总体流程为：

- 1) 初始化所有端口，通过 SPI 通信方式进行六路 AD 循环采集，并判断数据是否有误。
- 2) 通过 IIC 通信与 DS3231 模块获取实时时间将采集到的数据封装成帧，串口发送。
- 3) 初始化并挂载文件系统于 SD 卡，将数据分别保存于上位机和 SD 卡内。

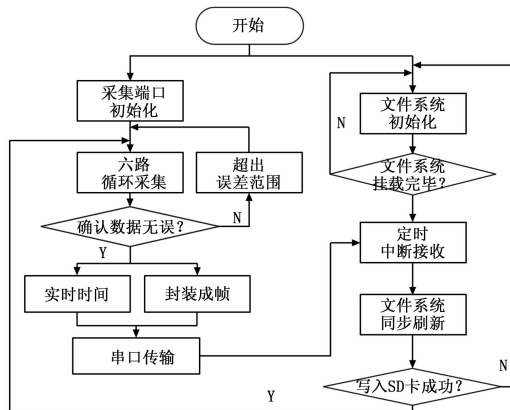


图 3 软件流程图

3.1 AD7791 的读写

MSP430 与 AD7791 之间通过 SPI 协议进行通信，一般需要连接四根线，分别是 CS 片选，主时钟 SCLK，主入从出 SOMI，主出从入 SIMO^[7]。选取单次转换读取模式。AD7791 通信寄存器 CR 有 8 个控制位，且只可以被写入，不能被读取。MSP430 与 AD7791 的数据信息交换总是以写入命令至通信寄存器 CR 开始的。如果要操作其他寄存器进行读或写，也必须先向通信寄存器写入相应的数据。并且每次对其他寄存器的操作完成后或者是 AD7791 刚刚上电复位后，总是会默认回到写通信寄存器 CR 状态。当 SPI 接口串行时钟出错时，可以将 DIN 引脚置高，向 SCLK 引脚连续输入 32 个串行时钟，即可使 ADC 返回到此默认状态^[8]。

3.2 DS3231 的读写

IIC 总线是一种双线串行接口，支持同步传输，一根串行时钟线 SCL，一根串行数据线 SDA，支持 IIC 协议的器件其 SCL 和 SDA 引脚都是开漏的，所以实际使用中这两根信号线都要接上拉电阻，阻值在 1~100 kΩ 之间，且为主从结构。在

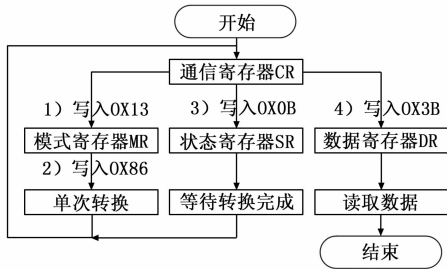


图 4 AD7791 通信流程图

此外设 DS2321 为从机, 每个挂在总线上的器件都有一个唯一的地址可供主机识别。

主机通过 IIC 总线和从机进行通信的过程如下: USCI 模块在通信前先检测总线是否处于空闲状态, 空闲时主机控制总线产生一个起始条件 (在 SCL 为高电平期间拉低 SDA 电平, 产生一个下降沿), 同时发送一个字节的从机地址信息, 其中前 7 位是从机地址, 用于识别挂在总线上的从机, 最后 1 位是读写控制位 R/W, 置 0 时表示接下来是主机向从机写入数据, 置 1 时表示接下来是主机读取从机的数据。

UCTXIFG 中断标志位会随着起始条件的产生而置位, 此时用户可将需要发送的数据信息写入发送缓冲寄存器 UCB1TXBUF 中, 随后数据被载入发送移位寄存器, 时钟脉冲下发送给从机, 同时中断标志位 UCTXIFG 将再次置位, 表明可以继续向发送缓冲寄存器 UCB1TXBUF 写入数据。发送从机地址信息后, 主机释放 SDA 信号线等待从机响应后的应答信号 ACK (应答时钟脉冲期间拉低 SDA 电平), 如果在第 9 个时钟周期内 SDA 信号线的电平被从机拉低, 表明从机对主机发送的地址做出了应答, 反之则没有应答。发送过程中, 只要 UCTXSTP 控制位或者 UCTXSTT 控制位没有置位, 则主机会一直发送数据或者挂起总线。

3.3 Fats 文件系统移植

要想更好地发挥 SD 卡保存数据的功能, 还需要引入文件系统对其进行管理。Fats 特别适用于小型嵌入式系统, 免费而且开源, 是目前使用非常广泛的嵌入式文件系统, 其主要包含 3 大部分:

API 接口层: f_mount、f_open、f_read 等接口。

VFS 文件层: 将复杂的扇区操作和块操作封装在一起, 用户不可见。

底层驱动层: 通过 SPI 通信方式操作的底层硬件。

底层驱动程序主要包括:

SDCard_init()、SDCard_fastMode()

SDCard_readFrame()、SDCard_sendFrame()

SDCard_setCSHigh()、SDCard_setCSLow()

这六组函数接口, 其中最重要的是在 SD 卡初始化的时候设为低速模式, 然后再设为快速模式。

4 最小二乘法修正

磁通门传感器受加工工艺和安装工艺水平的限制, 在三维空间的 XYZ 方向上不是完全理想正交⁹, 因此会存在误差。根据理想磁通门传感器测量环境磁场强度与姿态无关的特点, 当三轴磁传感器绕同一个轴转动时, 可以认为所测磁场总的模量不变。基于这个特点提出修正模型:

$$B^2 = a_1(B_x - B_{x0})^2 + a_2(B_y - B_{y0})^2 + a_3(B_z - B_{z0})^2 +$$

$$a_4(B_x - B_{x0})(B_y - B_{y0}) + a_5(B_y - B_{y0})(B_z - B_{z0}) + a_6(B_z - B_{z0})(B_x - B_{x0})$$

其中: $B=45535$ nT, 为当地地磁场模量, B_x, B_y, B_z 是一组三维磁场数据, 理想情况下 $B^2 = B_x^2 + B_y^2 + B_z^2$, B_{x0}, B_{y0}, B_{z0} 是三维输出零点, a_1, a_2, a_3 为传感器 X、Y、Z 轴的输出灵敏度系数, a_4, a_5, a_6 是 XY、YZ、ZX 之间的相互影响系数, 这 9 个参数共同构成了磁通门传感器的修正系数^[10-11]。

5 实验及结果

将实验样机置于磁屏蔽桶内部, 长时间测量各路数据, 观察一定时间内信号变化量, 计算零点稳定度。

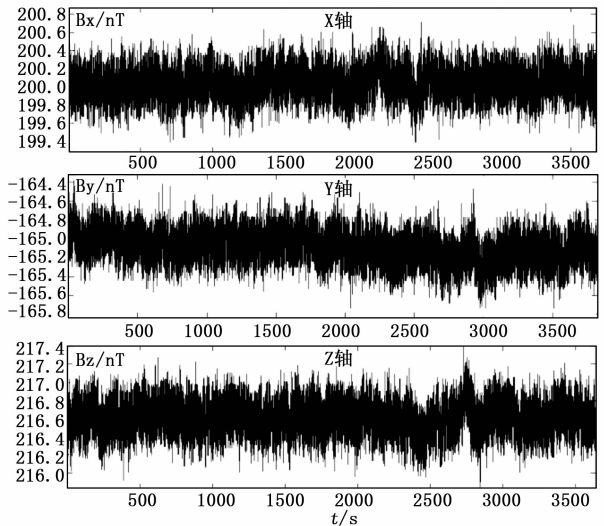


图 5 零点稳定度测试

从曲线数据计算得到:

X 轴自噪声均方值为 0.188 nT (RMS), 零点漂移为 0.20 nT/h。Y 轴自噪声均方值为 0.177 nT (RMS), 零点漂移为 0.31 nT/h。Z 轴自噪声均方值为 0.195 nT (RMS), 零点漂移为 0.23 nT/h。

经过足够长的时间后磁传感器达到稳定, 其输出数据的变化将围绕平均值来回漂移, 而不是单向漂移, 随着时间的增加, 稳定度的值还可以提高。

6 结论

该数据采集存储系统经过野外环境半年测试, 能够稳定的自适应环境弱磁场变化, 测量并持续修正结果, 在一定范围内减轻了重复计量标定的次数, 能够适应不同型号磁通门传感器输出。

通过最小二乘法、奇异值分解法进行采集数据修正, 大大改进了动态采集精度并降低了零点稳定度和噪声, 现已进入量产测试阶段。

从硬件层面 (芯片集成) 到软件层面 (低功耗设计) 对系统功耗进行了持续性优化, 耗电量由毫安级降低到微安级别, 大大保障了野外长时间电池供电, 使得长时间无人值守, 数据远距离传输成为可能。

同时, 外部实时存储系统本身是模块化的插拔件, 需要时既可以集成至系统板级内部, 也可单独拆分为一个存储部件, 增强了灵活性, 为后续不同型号的采集模块增加了通用性存储部件。

除此之外，三轴磁通门传感器并非绝对正交，在雅各比迭代、奇异值分解、最小二乘法等算法的基础上需要持续进行优化，寻找更加优秀的修正算法，提高响应精度。为后续系统持续优化，指明了方向。

参考文献：

[1] Ripka P. Review of Fluxgate Sensors [J]. Sensors and Actuators A: Phys., 1992 (3): 129-141.
 [2] Kubik, Vcelak J, O' Donnell J, et al. Triaxial Fluxgate Sensor with Electroplated Core [J]. Sensor and Actuators. A, Physical, 2009, 152 (2): 139-145.
 [3] 翁孟超, 杨志强, 宣仲义. 微型磁通门传感器的制备与测试研究进展 [J]. 仪表技术与传感器. 2008, 6: 10-15.
 [4] 张学孚, 陆怡良. 磁通门技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

(上接第 285 页)

2) 服务器端解析请求，并获取客户端 IP、kernel 文件名及大小。

3) 打开 FTP 服务，并建立连接，对比两端 kernel 文件名和大小，若一致，则从 FTP 服务器下载 kernel 文件到显示单元内存区。

4) 对 kernel 文件进行 CRC 校验。

5) 校验成功后，刷写到 FLASH，更新成功。

以配置文件为例，文件备份的实现步骤为：

1) 客户端与显示单元服务器端连接，发送配置文件备份请求。

2) 服务器端解析请求，并获取客户端 IP、配置文件的文件名及大小。

3) 打开 FTP 服务，并建立连接。

4) 在文件系统中搜索配置文件，并将该文件通过 FTP 服务器上传到本地路径下。

3.3 交互界面

Windows PC 端的客户端交互界面软件采用 C# winform 框架实现，C# 是一种面向对象的编程语言，C# 语法简化了 C++ 的诸多复杂性，提供很强的网络编程功能，基于 c# 的 socket 开发已经非常成熟，C# 应用由 .NET 平台提供安全机制确保安全性，语言表现力强，适用于可视化开发。客户端软件界面如图 7 所示，与服务器端进行连接之前，首先要将 PC 机的 IP 与显示单元的 IP 设置为同一网段，并确保通信端口没有被占用，否则会导致连接失败。



图 7 客户端软件界面

固件维护界面如图 8 所示，除了可以对底层软件进行单点

[5] 刘昭元, 刘诗斌. 基于 DSP 的数字磁通门传感器设计 [J]. 传感技术学报, 2009, 22 (9): 1280-1283.

[6] 王永博, 刘诗斌. 基于 ARM 的低成本高分辨率磁通门磁强计 [J]. 传感技术学报, 2014, 27 (3): 308-311.

[7] 党武松, 范寒柏, 胡 杨. 基于 AD7791 的海水温度和深度测量系统设计 [J]. 微型机与应用, 2013, 32 (20): 25-28.

[8] 杨理践, 涂传宾, 高松巍. 基于磁通门传感器的弱磁场检测方法 [J]. 仪表技术与传感器, 2014 (9): 84-87.

[9] 王晓美, 滕云田, 王喜珍, 等. GM4 型磁通门磁力仪性能检验方法 [J]. 地震地磁观测与研究. 2008, 29 (6): 88-94.

[10] 武修文, 张松勇. 基于磁通门与加速度传感器的三分量磁力仪研究 [J]. 现代电子技术, 2013, 36 (22): 96-98.

[11] Ripka P, Butta M, Fan J, et al. Sensitivity and noise of wire-core transverse fluxgate [J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2010, 46 (2): 654-657.

更新单点外，还支持一键批量下载，并且有更新进度提醒。



图 8 固件维护界面

4 结束语

通过对既有系统的分析，从优化设计与实现的角度对系统进行了重新的设计和优化，经过方案分析、设计实现和实际测试和验证，文章所设计的车载显示单元诊断维护系统能够实现监视应用程序、诊断故障信息、更新固件和配置文件的功。与过去传统的诊断维护方式相比，新的系统从架构层面和实现手段上引入了高速以太网通信，和基于以太网的套接字通信机制，提高通信速率的同时保证了系统信息的安全性，界面实现方面借用 PC 端友好的可视化开发，提高了用户操作的友好型，系统充分结合实际应用需求，提出并实现了一键操作和批量操作功能，提高了用户应用的便利性和高效性，系统设计充分考虑了软件的低耦合，功能的强可配置性，相比以往的系统在功能和性能上都有了极大的提升，是一套较为完善的显示单元平台诊断维护解决方案和系统。鉴于系统架构和设计的通用性，相关方案和功能通过简单的配置或修改能够兼容不同型号的显示单元，同时通过适当的变更能够快速的移植到其他类似功能需求的系统中。

参考文献：

[1] 王业流, 王 强. 嵌入式软件可移植性设计技术 [J]. 机车电传动, 2013 (2): 81-84.
 [2] 邹 捷. 基于异步委托方式的 Socket 通信研究 [J]. 现代计算机: 专业版, 2012 (27): 50-52.
 [3] 徐克宝, 武 慧, 文艺成. 基于 Socket 的 Windows 与 Linux 平台异步通信 [J]. 计算机系统应用, 2015, 24 (7): 232-235.