

基于 MSP430 的质子旋进式磁力仪设计

王应吉, 李 伟, 孙淑琴, 姜艳秋

(吉林大学 智能仪器与测控技术研究所, 长春 130061)

摘要: 针对国产的磁力仪功耗大, 稳定性较差, 精度较低 (± 1 nT) 的问题, 采用超低功耗单片机 MSP430F149, 设计了基于 MSP430 的质子旋进式磁力仪。给出了质子旋进磁力仪的工作原理及系统的硬件框图, 对质子旋进信号的配谐和放大作出了说明, 设计了对信号分频测量其周期的高精度间接测磁方法, 指出了单片机软件开发的要点。与 CZM-2 型质子旋进式磁力仪相比, 该设计功耗低, 稳定性强, 精度较高, 野外实测待机电流 0.8 mA, 最大误差 0.5 nT。

关键词: 质子旋进; 地磁场; 高精度测量; MSP430 单片机

中图分类号: TH763.1; TP39 **文献标识码:** A

Design for Proton Precession Magnetometer Based on MSP430

WANG Ying-ji, LI Wei, SUN Shu-qin, JIANG Yan-qi

(Institute of Intelligent Measurement and Control, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: The principle of proton precession magnetometer is recommend, and the characters of MSP430 low power-consumption MCU (Micro Control Unit) are mentioned. The hardware structure of the apparatus is given, how to make resonance of the proton precession signal and the method of amplification are showed. The method of high-precision magnetic field measurement based on frequency division and periods measurement is designed. The practical results from magnetometer indicate that the Power-down current is 0.8 mA and the max offset error is 0.5 nT.

Key words: proton precession; earth magnetism; high-precision measurement; MSP430

引 言

质子旋进式磁力仪主要供地面磁法勘探, 用于铁矿及其他金属矿床的普查、详查、地质填图。在航空、海洋、地震预报工作中, 用于地磁台站的磁变观测和流动磁测。目前地磁测量所使用的磁力仪多数是进口产品, 价格昂贵。国产的磁力仪以北京地质仪器厂生产的 CZM-2 型质子旋进式磁力仪居多。该仪器为 20 世纪 80 年代产品, 使用简单方便。但受当时技术条件限制, 仪器功耗大, 稳定性较差, 精度较低 (± 1 nT)。根据我国地磁流动测量与定点观测的需要, 研制新型高精度的质子旋进磁力仪具有重要的意义。笔者设计了一种新型的磁力仪, 与 CZM-2 型质子旋进式磁力仪相比, 实测精度提高 1 倍 (± 0.5 nT)。

1 质子旋进式磁力仪工作原理

质子磁力仪传感器由两个相同线圈反向串联而成, 以抑制外界干扰。线圈骨架中充满富含氢质子的

收稿日期:2005-07-24

基金项目:吉林大学创新基金资助项目(419070203537)

作者简介:王应吉(1956—),男,山西孝义人,吉林大学副教授,主要从事电磁法地学仪器研究,(Tel)86-431-8502474 (E-mail) wangyj@jlu.edu.cn;李伟(1983—),男,辽宁朝阳人,吉林大学硕士研究生,主要从事弱信号检测与处理研究,(Tel)86-431-8502474 (E-mail) liwei_jlu@126.com。

煤油或者水。当仪器进行极化时,线圈通入约1 A的直流电流。在线圈内部会产生与地磁场方向垂直、大于地磁场几个数量级的极化磁场。极化数秒后,氢质子磁矩就会沿着垂直于地磁场方向的极化磁场整齐排列。然后切断极化电流,线圈产生的极化磁场消失,质子磁矩便在地磁场的作用下以地磁场为轴处于旋进状态。在旋进过程中,质子的磁矩切割线圈而在线圈两端产生数微伏的感应电动势,其角频率与地磁场的关系^[1]

$$\omega_0 = \gamma H_0 \quad (1)$$

其中: H_0 为地磁场强度,单位是nT, $f = \frac{\omega_0}{2\pi}$ 为拉莫尔进动频率,

单位是Hz。 γ 为比例系数,称为旋磁比。对于航空煤油 $\gamma = (2.67513 \pm 0.00002) \text{ rad}/(\text{T} \cdot \text{s})$ 。其幅值随时间按指数形式衰减,称为自由感应衰减

$$\varepsilon \approx \mu_0 n A M \omega_0 e^{-t/T_2} \sin \omega_0 t \quad (2)$$

其中 μ_0 为磁导率, n 为线圈匝数, A 为线圈截面积, M 为质子磁化强度, T_2 为横向弛豫时间。

自由感应衰减信号如图1所示。此感应信号经过选频放大及整形分频后,由单片机测周期,转化成频率并乘以归一化系数便可直接读出地磁场值。

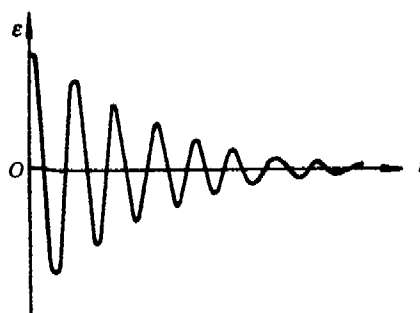


图1 自由感应衰减信号

Fig. 1 Free influence attenuate signal

2 系统总体设计方案

2.1 MSP430 超低功耗单片机的作用

单片机是系统的控制核心。根据仪器设计功能要求,单片机除实现基本的测量和控制功能外,还要实现以下功能:可以查询测量数据;保存仪器测量时的日期和时间;可以定时完成磁场的自动测量;自动完成数据的处理与保存;按键完成数据显示、测量曲线显示、与上位计算机的串行通讯和打印绘图输出等;由看门狗防止程序跑飞;具有温度监测功能,对仪器进行温度校正;检测电池电量。另外单片机应低功耗,以适于野外作业。

常用的51系列单片机,由于其片内资源的限制,要完成上述功能,须对其进行外部扩展。这样既增加了电路的复杂性和故障率,又因芯片的增多而增加了功耗。

本系统中采用美国TI公司生产的MSP430F系列超低功耗单片机^[2]。

MSP430系列单片机有以下几个系列MSP430×1×××、MSP430×3×××、MSP430×4×××等,而且全部成员软件兼容,可以方便地在系列各型号间移植。它采用冯诺依曼结构,RAM、ROM和全部外围模块都位于同一个地址空间内。同其他微控制器相比,MSP430系列可以大幅度延长电池的使用寿命。

MSP430F149单片机^[3]主要有以下特点:

- 1) 超低功耗结构体系,在1 MHz时钟频率时仅需250 μA工作电流,待机电流为0.1 μA;
- 2) 抗静电能力强;
- 3) 片内12位A/D转换;
- 4) 片内精密比较器;
- 5) 硬件乘法器;
- 6) 片内测温二极管;
- 7) MSP430全部为工业级;16位精简指令集MCU工作温度-40~85℃。

MSP430F149拥有60 kbit程序存储器、2 kbit数据存储器、48个独立I/O引脚和非常丰富的外围模块,几乎不用添加其他元件即可达到本系统的设计要求。

MSP430F149内部有256字节的在线可编程FLASH ROM,可以完成仪器设置数据的保存和读取。片内A/D用来检测电池电量。片内看门狗定时器防止程序跑飞。内部温度二极管用来测量仪器内部温度。片内串口可与上位机通讯。外挂DS1302时钟芯片,以便定时采集数据及记录时间。外接一片FLASH

ROM 以实现大量测量数据的存储。使用内部硬件乘法器,以加快信号处理的速度。其超低功耗内核可以延长电池的使用时间^[4-7]。

2.2 探头配谐原理

探头是感性元件,用来测量频率信号。质子磁力仪用 LC 并联谐振回路进行选频测量,谐振公式为

$$f = (2\pi \sqrt{LC})^{-1} \tag{3}$$

式(3)中: f 是 LC 并联谐振回路的中心频率; L 是探头的电感量; C 是仪器中的配谐电容值。只要使探头的电感 L 和仪器中配谐电容 C 较准确地配谐,就会使回路的谐振频率 f 谐振在探头中质子旋进频率的附近。

地磁场强度在短时间内变化较小,质子磁力仪利用这一特性实现了仪器选频测量的自动跟踪功能,利用上一次测量的频率值 f (或磁场值 T),根据式(3) 计算出下一次选频测量的配谐电容值

$$C = ((2\pi f)^2 L)^{-1} \tag{4}$$

由于探头配谐电路工作在微弱信号下,只能通过单片机控制继电器切换配谐电容,所以用一组 I/O 口 P_2 控制 8 个继电器来实现 256 种不同的配谐电容值。

2.3 信号放大器

放大器^[8]探头输出的信号仅数微伏,必须放大到“伏”数量级才能供测量电路进行数字频率测量。因此对放大器的要求是低噪声、高增益。为提高输出信号的信噪比,设计放大器具有选频特性,通过改变配谐电容来改变放大器的中心频率,以便测量不同的磁场强度。

放大器的各项指标分别为:工作频率范围 1 300 ~ 3 100 Hz,增益大于 118 dB,输入阻抗大于 10 k Ω ,选频通带 $f=40 \sim 100$ Hz。

2.4 信号频率测量

质子磁力仪的测频方法通常有两种:锁相倍频计数测频率和分频测量信号周期。

锁相倍频计数的方法在国内的仪器中应用较为广泛。将信号整形后倍频,再通过有门控的计数器计数。通过数字电路控制门控时间使计数值正好是地磁场值。这种方法的优点是不需要复杂计算就能实现频率到地磁场值的转换,但是由于信号频率变化范围较宽(1 000 ~ 3 000 Hz),且信号幅度是指数衰减的,锁相环很难实现在整个频带内精确倍频,因此这种方法精度较低。

分频测周期的方法电路实现较容易(见图 2)。将整形后的信号经数字电路 256 分频后测量其周期,并由单片机运算得出结果,由于误差只由 256 分频的最后一个周期的上升沿引起,因此误差很小,精度

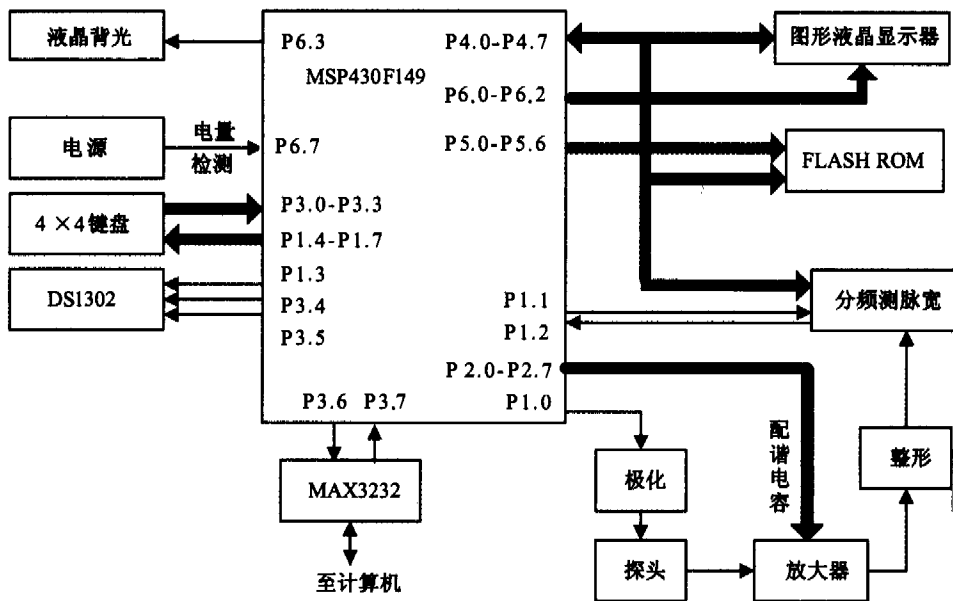


图 2 质子旋进磁力仪整体结构框图

Fig. 2 The structure of the instrument

较高。

频率测量电路采用由可编程逻辑器件(CPLD: Complex Programmable Logic Device)组成分频测周期逻辑电路,由高稳定晶振提供测量时钟源。此电路对选频放大器输出的旋进信号进行数字周期测量,石英晶体振荡器的振荡频率为40 MHz,精度可达±25 ns。将其作为计数脉冲,由测量电路的计数器记录脉冲个数,通过单片机计算处理可得到精确的频率值,如图3所示。



图3 分频测脉冲宽度的时序图

Fig. 3 The waveform of disporting frequency

考虑到低功耗设计及3.3 V供电电源,电路采用EPM7064AETI44-10 CPLD芯片,而且仪器在非测量状态下将关闭此部分电源以节省电量。用Verilog HDL(Verilog High speed integrated circuit hardware Description Language)语言实现编程^[9]。

2.5 其他电路器件的选择

考虑到仪器的工作温度范围较大,液晶显示器采用耐低温特性较好的图形液晶显示器。为降低功耗,提高电源利用率,各级电路采用LM2674供电^[10]。这是一款纹波及干扰较小的DC-DC芯片,但仍要做好电源及数字电路部分的屏蔽及与模拟信号放大器的隔离。FLASH ROM(Flash Read Only Memory)采用三星公司的64 MB存储器K9F1208^[11]。

3 单片机软件开发要点

MSP430开发软件^[12,13]有功能强大的C编译器,故软件部分采用C语言编写^[14,15]。这里采用IAR公司EW-430 V2.20A版MSP430开发软件。

由于篇幅的限制,详细程序不在此列出,需要说明两点。

- 1) MSP430单片机的总线是不对外开放的。要对液晶及FLASH存储器进行信号传送,只能用I/O口模拟总线。这一点对编程来说略显不便。
- 2) MSP430的内部测温二极管的精度较低。可能有几摄氏度的误差。但对仪器精度校正,影响并不大。

4 整机测试

测试地点:某市八一乡大长沟南。

整机电流:极化电流1 200 mA;信号放大测量时38 mA;显示数据时15 mA;待机电流0.8 mA。

地磁场测量方法:同一地点测量4次取平均值,测得地磁场值如表1所示。

表1 仪器测试数据
Tab. 1 The data of testing

测点号	EVNI	本仪器	测点号	EVNI	本仪器
1	54 582.2	54 582.4	5	54 577.3	54 577.7
2	54 579.4	54 579.3	6	54 582.4	54 582.6
3	54 582.5	54 582.2	7	54 578.4	54 578.6
4	54 570.3	54 570.0			

注:EVNI地球测量系统是加拿大Scintrex公司的产品,精度0.1 nT,分辨力0.1 nT

以EVNI(environment)地球测量系统的测量数据作为比较参照,可以得出结论:本仪器分辨力0.1 nT,精度0.5 nT。

5 结 语

采用MSP430F149作为处理芯片,外围元件少;系统故障率低;功耗低;电池使用时间长;仪器内部元件对放大器的电磁干扰小;仪器的体积小。采用分频测周期的间接测频方法,仪器的测量精度高。

但同某些高档进口仪器相比还有一定的差距,以后还可对其作进一步改进。

参考文献:

- [1] 王君, 凌振宝. 传感器与检测技术 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 2003: 20-29.
WANG Jun, LING Zhen-bao. Sensor and Detection Technique [M]. Changchun: Jilin University Press, 2003: 20-29.
- [2] Texas Instruments Company. MSP430 × 1 × × Family User's Guide [DB/OL]. [2006-1-24]. <http://focus.ti.com/docs/mcu/catalog/resources/appnoteabstract.jhtml?familyId=342&abstractName=slau049e>.
- [3] Texas Instruments Company. MSP430F149 Datasheet [DB/OL]. [2006-1-24]. <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/msp430f149.html>.
- [4] 魏小龙. MSP430 系列单片机接口技术及系统设计实例 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
WEI Xiao-long. Example of MSP430 Single-Chip Microcomputer Interface and System Design [M]. Beijing: Beihang University Press, 2002.
- [5] 胡大可. MSP430 系列 16 位单片机原理和应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.
HU Da-ke. MSP430 16-bit Single-Chip Microcomputer Theory and Application [M]. Beijing: Beihang University Press, 2000.
- [6] 胡大可. MSP430 系列 FLASH 型 16 位单片机 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
HU Da-ke. MSP430 16-bit Single-Chip Microcomputer of Flash Type [M]. Beijing: Beihang University Press, 2001.
- [7] 沈建华, 杨艳琴, 翟曙. MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
SHEN Jian-hua, YANG Yan-qin, ZHAI Shu. MSP430 16-bit Low Power-Consumption Single-Chip Microcomputer Theory and Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [8] 程德福, 林君, 于生宝, 等. 瞬变电磁法弱信号检测技术研究 [J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2002, 20 (2): 1-5.
CHENG De-fu, LIN Jun, YU Sheng-bao, et al. Study on TEM Weak Signal Detection Techniques [J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2002, 20 (2): 1-5.
- [9] 夏宇闻. Verilog 数字系统设计 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003: 9-96.
XIA Yu-wen. Digital System Design of Verilog [M]. Beijing: Beihang University Press, 2003: 9-96.
- [10] National Semiconductor Company. LM2674 Datasheet [DB/OL]. [2006-1-24] <http://www.national.com/pf/LM/LM2674.html>.
- [11] Samsung Electronics Company. K9F1208 Datasheet [DB/OL]. [2006-1-24] <http://www.samsung.com/Products/Semiconductor/Flash/NAND/512Mbit/K9F1208U0B/K9F1208U0B.html>.
- [12] 胡屏, 柏军. 单片机应用系统中的看门狗技术 [J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2003, 21 (2): 205-208.
HU Ping, BAI Jun. Watch-Dog Technologies in Single-Chip Microcomputer Application Systems [J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2003, 21 (2): 205-208.
- [13] 王保印, 康健, 姜传国. 用 VC6.0 中 MSCComm 控件实现多类型文件传送 [J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2004, 22 (2): 164-168.
WANG Bao-yin, KANG Jian, JIANG Chuan-guo. Transmitting Files Between Computers Using MSCComm Control in VC++ 6.0 [J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2004, 22 (2): 164-168.
- [14] 胡大可. MSP430 系列单片机 C 语言程序设计与开发 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
HU Da-ke. Programming and Development in C Language with MSP430 Single-Chip Microcomputer [M]. Beijing: Beihang University Press, 2003.
- [15] 谭浩强. C 程序设计 [M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 1999.
TAN Hao-qiang. Programming in C language [M]. 2th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. (Ed.: T)