

# 磁通门磁力仪背景磁场的自动补偿设计\*

胡星星,滕云田,谢凡,和锐,黄经国  
(中国地震局地球物理研究所 北京 100081)

**摘要:**提出一种在单片机的控制下用逐次渐近反馈比较式的背景磁场自动补偿方法,设计了实现高精度自动补偿的硬件电路和程序实现。仪器经自动补偿后,在大约 60 000 nT 的背景地磁场中,能使磁力计探头工作在几个 nT 左右的真正“零背景场”下。适于井下磁力计或其他不能进行实地操作的磁力计的背景场补偿,并有利于磁力计分辨力的提高。同时也实现了仪器观测的自动化、智能化和远程监控。

**关键词:**磁通门磁力仪;自动补偿;相对观测;背景磁场

中图分类号:TH762 文献标识码:B 国家标准学科分类代码:170.35

## Background magnetic field auto-compensation of flux-gate magnetometer

Hu Xingxing, Teng Yuntian, Xie Fan, He Rui, Huang Jingguo  
(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** A novel method of background geomagnetic field auto compensation is presented in this paper, which is based on successive approximation through the way of comparison and feedback. This paper also introduces the design of the high accuracy auto compensation hardware and software algorithm. Result shows that the proposed method can ensure the sensor work at ‘zero background magnetic field’ of few nTs under about 60 000 nTs real geomagnetic background. Furthermore, the method presented in this paper can also realize automatic and intelligent observation and remote control of the instrument.

**Key words:** flux-gate magnetometer; auto-compensation; relative recording; background magnetic field

## 1 引言

由于磁通门磁力仪具有重量轻、体积小、电路简单、功耗低、稳定性好等优点,被广泛用于各种场合的磁场强度的测量。特别是其灵敏度可以做得很高,尤其适合在零磁场和弱磁场下应用<sup>[1-2]</sup>,加上其测量方向性强(矢量测量),所以,磁通门磁力仪在星际磁测、磁法勘探、地磁观测等领域得到了广泛的应用<sup>[3]</sup>。在地球科学研究和地震监测与预报研究中,地磁场观测是一种重要的监测手段,它与地震动观测、地下流体观测、地应变观测、水氡气观测以及地电观测等观测手段相互结合、相互补充,构成地震台站较为完备的地震监测方法。中国地震局地磁台

站基本台网从 2003 年起已经采用三分量磁通门磁力仪<sup>[4]</sup>用作地磁相对观测仪器,“十五”规划增加了数字化地磁相对观测磁通门磁力仪 GM4 和从丹麦进口的 FGE 磁通门磁力仪。由于地磁场强一般为 60 000 nT 左右<sup>[5]</sup>,且较为稳定,正常情况下其日变化幅度仅为几十 nT,且动态范围太大就会使得磁力仪分辨率降低,对模拟放大电路和模数转换提出更高要求,也会极大地增加研制成本,而磁通门磁力计传感器探头工作在反复饱和和磁化状态下,当被测磁场较大时,使得探头灵敏度表现出非线性特性,在对地磁观测的地震信息研究中,也往往只关心地磁场的变化场,即进行“相对观测”<sup>[6]</sup>。因此,用于地磁观测的磁通门磁力仪通过对主要地磁场(“背景场或地磁基本场”)实行补偿,使磁力仪探头铁芯工作在零场附

收稿日期:2009-09 Received Date:2009-09

\* 基金项目:“十一五”国家科技支撑项目(2006BAC01B01-02-05)、公益性行业(地震)科研专项(20070817)资助项目

近 ,使其分辨率、动态范围和线性特性都能满足记录地磁场分量变化的要求。目前一些磁通门磁力仪主要采用手动的背景磁场补偿方式<sup>[7]</sup> ,这些补偿方法均需实地操作 ,不适宜于远程控制 ,比如井下磁力仪的补偿或网络化的远程监控等情况 ,且操作不便 ,精度低 ,补偿后的“零场”在几百个 nT 左右 ,有的操作烦琐 ,需反复测量和设置 ,补偿效率低。在井下磁力计的研制中 ,设计了一种在单片机控制下的逐次渐进反馈比较式的背景磁场自动补偿方法 ,设计了能实现高精度和高效率的自动补偿的硬件电路和程序实现。经自动补偿后 ,在大约 60 000 nT 的背景地磁场中 ,能使磁力计探头铁芯工作在几个 nT 左右的真正“零场”下 ,保证了磁力计工作的有效动态范围 ,有利于磁力计分辨率的进一步提高。同时使仪器易于实现现代观测的自动化、智能化和远程监控的需要。

## 2 磁通门磁力仪背景场补偿原理

图 1 是磁通门磁力仪工作的原理框图。其传感器探头结构如图 2 所示 ,磁力仪的探头是由 2 根高磁导率且电磁参数完全对称的软磁芯构成(实际中往往做成圆形或跑道形以增加对称性) ,通以一定频率  $f_0$  的交变激励电流使其周期性过饱和磁化。当沿磁通门探头方向有外磁场时 ,在信号线圈感应电势中就会出现幅度随环境磁场强度而变化的偶次谐波。实际中通过检测其二次谐波电压  $2f_0$  来实现对环境磁场的测量<sup>[8]</sup>。

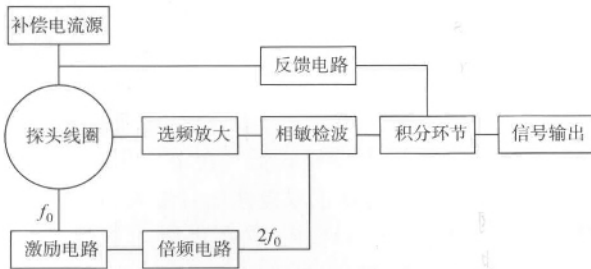


图 1 磁通门磁力仪原理框图  
Fig. 1 Schematic diagram of flux-gate magnetometer

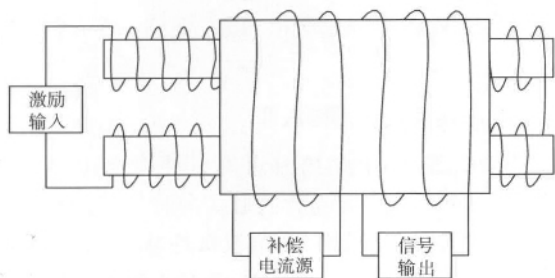


图 2 磁力仪探头结构  
Fig. 2 Sensor structure of flux-gate magnetometer

为提高磁力仪检测地磁场微弱变化场的分辨力 ,给探头补偿线圈通以补偿电流 ,产生一个与探头轴向地磁场大小相同、方向相反的“补偿磁场” ,使探头铁芯近似工作于零场状态 ,而磁力仪的动态范围则可以压缩至  $\pm 2\ 500$  nT。由于补偿磁场要远大于磁力仪的动态范围 ,故其精度和稳定性也是影响磁力仪整体性能的关键环节。

目前大多数磁通门磁力仪都采用分压电阻来控制补偿电流的大小 ,如美国 SMALL 磁通门磁力仪采用的就是根据仪器所要安装地点的地磁场的绝对观测值来计算出分压电阻的大小 ,通过更换适当的分压电阻来进行补偿。加拿大 MFM3 和丹麦的 FGE 磁通门磁力仪采用手动开关加机械电位器来补偿<sup>[7]</sup>。中国地震局地磁台网“十五”规划增加的数字化相对地磁观测磁通门磁力仪 GM4 采用手动数字补偿方式。采用分压电阻或分档开关补偿方式需实地操作 ,不适宜于远程控制 ,比如井下磁力仪的补偿或网络化的远程监控等情况 ,开关和电位器的触点还会影响整机的长期测量精度 ,且操作不便 ,补偿精度低 ,数字补偿方式可以实行远程操作 ,使用高精度的 D/A 可以提高补偿的精度和稳定性 ,一般都可以使“零场”补偿到  $\pm 100$  nT 范围内 ,但操作烦琐 ,需反复测量和设置 ,补偿效率低。

## 3 磁通门磁力仪背景场自动补偿原理

为进一步提高背景磁场的补偿精度 ,实现磁通门磁力仪观测的自动化、智能化和远程监控的要求 ,就需要实现背景磁场的自动补偿。一种自动补偿的实现方式是以仪器测量的动态范围(比如  $2\ 500$  nT)为补偿阈值 ,A/D 转换在主控单元的控制下采集传感器的输出信号 ,若 A/D 输出为  $2\ 500$  nT(满幅) ,说明被测磁场强度大于仪器所能承受的动态范围 ,主控单元应增加补偿量 ,该补偿量送至 D/A 转换器 ,控制补偿电流的大小变化 ,从而使补偿磁场的大小发生变化 ,如此反复 ,直至传感器输出在仪器的动态范围内<sup>[7]</sup>。这种补偿方式的不足在于精度不好控制 ,在极坏的情况下 ,补偿的结果可能使“零场”接近  $2\ 500$  nT ,这使得仪器实际的动态范围减小 ,以至使磁力仪出现单边限幅等不正常工作情况。若用减小阈值来提高精度 ,则又会使补偿效率降低。

在“十一五”科技支撑计划“井下磁力计研制”的项目实施中 ,实行了自动补偿和微机控制手动数字补偿 2 种方式。在井下定向、实验调试、系统标定等情况下需要用手动设置补偿值大小。在井下正常工作时则需要自动补偿以提高补偿精度。上位机监控软件的控制操作界面如图 3 所示。自动补偿原理设计如下 :图 4 是实现井下磁力计自动补偿的原理框图 ,补偿前先将 D/A

寄存器清零, D/A 的输出也为 0。在 MCU 的逻辑控制下, 对传感器探头的输出进行 A/D 转换, 这个转换结果  $U_i$  跟预先设定的阈值  $U_0$  进行比较。如果  $|U_i| > |U_0|$ , 说明需要补偿。同时根据  $U_i$  的正负判别补偿的方向及阈值  $U_0$  的正负, 确定补偿寄存器值的符号位值和阈值  $U_0$  的符号位值。然后将补偿寄存器的最高数值位置 1, 使寄存器的数值位输出为 100...00, 这个数字量被 D/A 转换器转换成相应的模拟补偿电压送给传感器探头补偿线圈, 延时后再对传感器探头输出进行 A/D 转换, 对这个新的转换结果再跟阈值  $U_0$  进行比较, 如果补偿后使得  $U_i$  跟上次的 A/D 转换值符号相反且有  $|U_i| > |U_0|$ , 说明补偿值过大, 则这个“1”应去掉, 如果补偿后使得  $U_i$  跟上次的 A/D 转换值符号相同且仍有  $|U_i| > |U_0|$ , 说明补偿值还不够大, 这个“1”应予保留, 如果补偿后有  $|U_i| < |U_0|$ , 说明已达到补偿目标要求, 可以退出补偿循环。如果经这一位的补偿后仍有  $|U_i| > |U_0|$ , 则再对其他次高位逐位进行同样的补偿循环, 直到最低位比较完为止, 或在某一位补偿后有  $|U_i| < |U_0|$  则退出补偿循环。从上面的比较过程可以看出, 这种补偿过程是很高效的。当采用较高精度的 16 位的 D/A 时, 单分量的补偿过程最多循环 15 次(双极性输出, 最高位是符号位)。而且补偿阈值(即补偿后的“零场”范围)可以任意设置, 在“井下磁力计研制”中  $U_0$  设置为 30 nT, 实际补偿后一般都在几到十几 nT 内, 使磁力计探头工作在真正的“零场”下。



图3 背景磁场补偿设置界面

Fig. 3 Interface of the compensation options

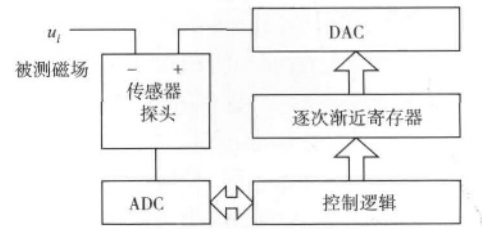


图4 背景磁场自动补偿原理框图

Fig. 4 Principle diagram of auto-compensation

## 4 磁力计背景磁场自动补偿硬件电路的设计

### 4.1 控制单元电路

井下磁力计采用 MSP430 单片机作为控制、采集和数据通信的控制处理单元。MSP430 是基于 RISC 结构的 16 位单片机, 具有功耗小、处理能力强、外围接口丰富、支持 JTAG 在线调试等特点。尤其是 MSP430F1611 还集成了 10 KB 的大容量片上数据 SRAM 和 48 KB 的 Flash 程序存储空间, 能够满足磁力计对较大存储空间的要求, 因此不用片外扩展 Flash 程序存储器和数据存储器, 简化了硬件电路设计和软件设计, 节省了电路板空间, 提高了系统稳定性, 也降低了系统功耗。

### 4.2 A/D 转换

由于磁力计进行相对观测的测量范围为  $\pm 2500$  nT, 要达到 0.1 nT 分辨率, 观测值要保留两位小数, 其动态范围达 94 dB, 因此 A/D 转换要选用 17 位分辨率以上的芯片。AD 公司的 24 位  $\Sigma - \Delta$  模数转换芯片 AD7732 具有 0.001 5% 的非线性特性, 在 500 Hz 的采样率下可以达到 18 位的 p-p(峰-峰)分辨率, 能够满足磁力计动态范围的要求, 且价格较低。在单 5 V 的模拟供电下它还具有  $\pm 10$  V 的真正双极性信号输入, 正好可以与探头的模拟输出信号匹配; 数字供电可以是 5 V 或 3.3 V, 因此其数字接口引脚可以直接与单片机相连而不必进行电平转换。此外, 它还具有低功耗特性和 28 脚 TSSOP 的小型封装。为了降低噪声, 保证其应有的转换精度和分辨率, 2.5 V 的参考电压采用 MAX6325, 其温度系数可达  $1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ (最大值)以及低至 1.5  $\mu\text{V}$  的峰-峰值噪声。

### 4.3 D/A 转换及补偿电流源

补偿电路由单片机向 D/A 写入补偿值, D/A 输出经电压-电流变换后以恒流源的形式向补偿线圈提供补偿电流。D/A 转换器采用 16 位双极性输出的 MAX5442, 它具有 16 位的转换精度、 $\pm 2$ LSB 的非线性、 $\pm 1$ LSB 的噪声、低至 120  $\mu\text{A}$  的电源电流以及小型封装等特性, 兼容 SPI 三线串行数据总线易于单片机的控制, 双极性输

出时内置电阻简化了外围电路设计,免去了调试,保证了转换的精度。16 位有符号整数的取值范围是  $-32\ 768 \sim +32\ 767$ ,取  $2\ \text{nT/LSB}$  的补偿灵敏度,可满足磁力计  $\pm 65\ 000\ \text{nT}$  的测量范围的要求。在双极性模拟输出时,MAX5442 输入采用的是偏移二进制码,如表 1 所示,因此,单片机向 MAX5442 写入补偿值时需要将 16 位符号整型数的符号位求反。

表 1 MAX5442 双极性输出时的偏移二进制码与模拟输出关系

Table 1 MAX5442 bipolar code table

DACLATCH		CONTENTS	ANALOG OUTPUT $V_{OUT}$
MSB	LSB		
1111	1111	1111	$+V_{REF} \times (32.767/32.768)$
1000	0000	0000	$+V_{REF} \times (1/32.768)$
1000	0000	0000	0
0111	1111	1111	$-V_{REF} \times (1/32.768)$
0000	0000	0000	$-V_{REF} \times (32.768/32.768) = -V_{REF}$

恒流源输出电路如图 5 所示<sup>[9]</sup>,这种电路只使用一个运算放大器且可使负载一端接地。在 IC 为理想运算放大器时,输出电阻  $R_o$  为:

$$R_o = \frac{R_1 R_5 (R_3 + R_4)}{R_1 R_4 + R_1 R_5 - R_2 R_3}$$

当满足  $R_1 R_4 + R_1 R_5 - R_2 R_3 = 0$  即  $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3 + R_4}{R_3}$  时,

$R_o \rightarrow \infty$ ,电路具有恒流输出特性,输出电流  $i_{out}$  为

$$i_{out} = -\frac{R_2 V}{R_1 R_5}$$

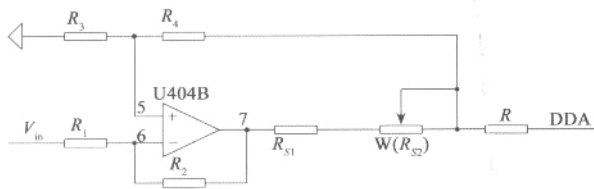


图 5 D/A 恒流源电路

Fig. 5 D/A output circuit

### 5 实现背景磁场自动补偿的程序设计

当磁力计收到上位机的背景场自动补偿指令时,调用自动补偿子程序,在子程序执行期间,关闭所有中断而不响应在此期间的其他控制操作,以保证程序运行的稳定可靠。程序设计流程如图 6 所示。

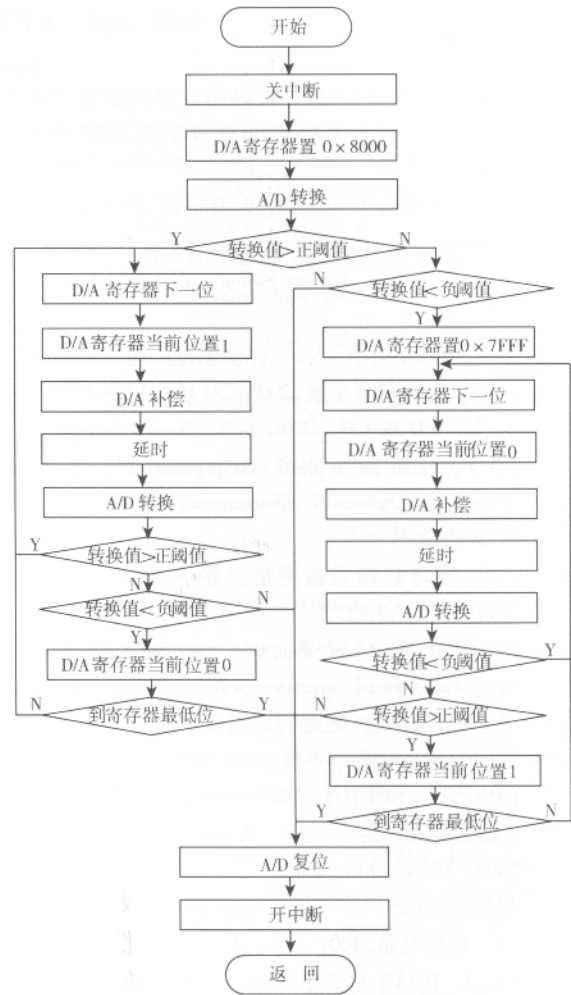


图 6 磁力仪实现背景磁场自动补偿程序流程

Fig. 6 Flow-chart of the compensation program

### 6 结 论

要使磁通门磁力仪在大约  $60\ 000\ \text{nT}$  的背景磁场中记录日变化幅度只有约几十  $\text{nT}$  的变化场,背景磁场的补偿精度和稳定性是影响磁力计整机性能的关键因素。国家地磁台网所采用的国内、外磁通门磁力计主要采用手动背景场补偿方式,精度低,操作不便,尤其是需要实地操作,不能用于井下磁力计。本文采用高精度 16 位 D/A 加恒流源的微机数字补偿方式,对提高磁力计整机的稳定性和测量准确性以及降低整机噪声提供了保证。而本文提出的逐次渐近反馈比较式的背景磁场自动补偿方法,能够解决手动补偿需要实地操作、不能用于仪器的远程控制等问题,同时能够提高补偿的精度和效率,实践证明补偿后能使磁力计探头工作在几个  $\text{nT}$  左右的真正“零场”下,不仅使磁通门磁力仪的分辨力和稳定性能够得到进一步提高,还可以使磁通门磁力仪能够实现观测的自动化、智能化和远程监控的功能,对推动磁通门磁力计技术的发展亦具有积极意义。

## 参考文献

- [ 1 ] 林钢, 杨会平, 白彦峥, 等. 高精度空间磁通门磁力计 [ J ]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33( 12 ): 61-63.  
LIN G, YANG H P, BAI Y ZH, et al. Space fluxgate magnetometer with high precision [ J ]. Huazhong Univ. of Sci. & Tech: Nature Science Edition [ J ], 2005, 33 ( 12 ) 61-63.
- [ 2 ] 何焱, 吴武臣, 丁广玉. 一种便于推广应用的磁通门技术 [ J ]. 仪器仪表学报, 2006, 27( 10 ): 1279-1282.  
HE Y, WU W CH, DING G Y. New technique of flux-gate easier to be applied and popularized [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27 ( 10 ): 1279-1282.
- [ 3 ] 林君. 地球物理弱磁测量仪器进展. 石油仪器 [ J ]. 1997, 11( 2 ) 7-11.  
LIN J. Progress of magnetic instrument in geophysics [ J ]. Petroleum Instruments, 1997, 11( 2 ): 7-11.
- [ 4 ] 丁鸿佳, 隋厚堂. 磁通门磁力仪和探头研制的最新进展 [ J ]. 地球物理学进展, 2004, 19( 4 ) 743-745.  
DING H J, SUI H T. The recent progress of the fluxgate magnetometer and sensor. Progress In Geophysics [ J ]. 2004, 19( 4 ) 743-745.
- [ 5 ] 刘佳, 段红梅, 李伟. 井中磁通门磁力仪探磁技术研究 [ J ]. 地质装备, 2007, 8( 5 ) 21-23.  
LIU J, DUAN H M, LI W. The technology study for magnetic detection of flux-gate magnetometer in well [ J ]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2007, 8( 5 ): 21-23.
- [ 6 ] 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 [ J ], 2008, 29( 6 ) 88-94.  
WANG X M, TENG Y T, WANG X ZH, et al. The test method for the performance of fluxgate magnetometer [ J ]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2008, 29( 6 ) 88-94.
- [ 7 ] 李江, 周勋. 磁通门磁力仪自动补偿的实现 [ J ]. 地震地磁观测与研究, 2002, 23( 3 ) 59-64.  
LI J, ZHOU X. The realization of fluxgate magnetometer auto-compensation [ J ]. Seismological And Geomagnetic Observation And Research, 2002, 23( 3 ) 59-64.
- [ 8 ] 张学孚, 陆怡良. 磁通门技术 [ M ]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 8-9.  
ZHANG X F, LU Y L. Technology of magnetometer [ M ]. Beijing: National defence industry Press, 1995: 8-9.
- [ 9 ] 马场清太郎. 运算放大器应用电路设计 [ M ] 何希才, 译. 北京: 科学出版社, 2007: 175-180.  
MACHANGQINGTAILAN. Op amplifier niyuru jitsuyou kairo sekkei [ M ]. HE X C, trans. Beijing: Science Press, 2007: 175-180.

## 作者简介



Hu Xingxing

胡星星, 2007 年于中国地震局地球物理研究所获得硕士学位, 现为中国地震局地球物理研究所助理研究员、博士研究生, 主要从事地球物理观测仪器研发和地球物理信息技术研究。  
E-mail: huxx05@sohu.com



Teng Yuntian

滕云田( 通讯作者 ), 1988 年于北京理工大学获得学士学位, 1991 年于中国地震局地球物理研究所获得硕士学位, 2000 年于中国地震局地球物理研究所获得博士学位, 现为中国地震局地球物理研究所研究员、博士生导师, 主要研究方向为地球探测与信息技术。  
E-mail: tyt1966@sohu.com

Teng Yuntian ( Corresponding author ) received BSc from Beijing Institute of Technology in 1988, MSc and PhD both from Institute of Geophysics, China Earthquake Administration in 1991 and 2000, respectively. Currently he is a research fellow and PhD supervisor in Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. His main research interest is geophysical prospecting and information technology.