

# 基于峰差法的磁通门磁探仪的研制\*

瞿少成 李文通 刘海洋 田瑶  
(华中师范大学 信息技术系 武汉 430079)

**摘要:** 研究了一种基于峰差法的磁通门磁探仪系统。该系统由 ATmega8L 单片机产生数字方波激励信号直接驱动磁通门探头,改善了传统 RC 模拟激磁电路的稳定性问题;用结构更加简单的峰值检波电路取代传统复杂的谐波法电路,简化了电路设计,并降低了系统功耗;采用 16 位专用 ADC 对磁通门输出信号进行采样,保证了系统的分辨率;为进一步控制系统温漂,增加了温度检测补偿模块。实验结果表明,该系统实现了预期功能,性价比较高,具有良好的推广价值。

**关键词:** 数字激励;峰值检波;磁通门;温度补偿;ATmega8L

**中图分类号:** TM930.12<sup>+</sup>4 **文献标识码:** A

## Design of fluxgate magnetometer based on peak detection approach

Qu Shaocheng Li Wentong Liu Haiyang Tian Yao

(Department of Information Technology, HuaZhong Normal University, Wuhan 430079)

**Abstract:** A novel fluxgate magnetometer system is introduced based on peak detection approach. To avoid stability problem caused traditional RC analog drive circuit, digital square-wave signal from ATmega8L MCU is applied to directly drive the fluxgate sensor, which improve efficiently the stability of the system. By replacing complex harmonic circuit by peak detection approach, the design of circuit is simplified and power consumption is reduced. Furthermore, the system resolution factor is guaranteed by sampling the fluxgate signal with special ADC(16 bit). In addition, the temperature compensating circuit is added to reduce the temperature drift. Finally, experiment results show that the systems achieve all technical requirements, and its have good engineering value.

**Keywords:** digit driver; peak detection; fluxgate; temperature compensating; ATmega8L

## 0 引言

磁通门磁探仪是利用被测磁场中高导磁铁芯在交变磁场的饱和激励下,其磁感应强度与磁场强度的非线性关系来测量弱磁场的。这种物理现象对被测环境磁场来说好像是一道“门”,通过这道“门”,相应的磁通量即被调制,并产生感应电势。与其他类型测磁仪器相比,磁通门磁探仪具有分辨率高,测量弱磁场范围宽,可靠、简易、经济、耐用,能够直接测量磁场的分量和适于在速运动系统中使用等特点<sup>[1]</sup>。因此从问世以来得到了不断的发展和改进,并被广泛应用在各个领域,如地磁研究、地质勘探、武器、侦察、材料无损探伤以及空间磁场测量等。传统的磁通门磁探仪在激磁电路的设计上,通常采用模拟的 RC 电路,不可避免地带来稳定性问题;在信号处理上,通常采用复杂的谐波法,其电路设计烦琐、功耗较高。随着自动控制、新的物理效应和检测方法的普及和渗透,使得采用更简单稳定

的数字激励、峰值检波法来研制新型实用磁通门磁探仪成为可能<sup>[2-3]</sup>。本文介绍了一种基于峰差法的单磁芯单绕组磁通门传感器的基本原理,研制了一种实用的磁通门磁探仪系统。整个设计以 ATmega8L 单片机为控制核心,由单片机产生数字激励源信号并经功率放大直接驱动磁通门探头;然后由峰值检波法提取磁通门信号,经积分滤波处理后由专用 A/D 对进行采样,送单片机分析处理后,通过串口送给 PC 机经配套软件进行运算,并设置相关参数,从而得到最终的输出量。实验结果表明,系统精度较高、稳定性好、具有良好的市场前景。

## 1 磁通门原理与磁探仪系统组成

### 1.1 磁通门原理

磁通门现象实际上是一种变压器效应的伴生现象,服从电磁感应定律。根据其磁芯和绕组的结构、形状及激励源的不同,可分成多种类型<sup>[2]</sup>。本文采用现有技术中结构

\*基金项目:武汉市科技攻关计划(200810321132)

简单应用较广泛的一种单磁芯单绕组磁通门。该磁通门只有一个绕组,此绕组既为励磁绕组又作测量绕组,如图 1 所示。

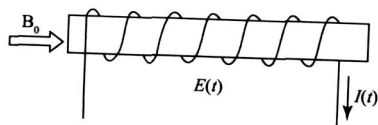


图 1 单磁芯单绕组磁通门结构

假设励磁磁场强度为:  $H_m \cos t$ , 就能得到磁通门磁芯上的总磁场强度为:

$$H(t) = H_0 + H_m \cos t \quad (1)$$

式中:  $H_0$  为外部被测磁场强度;  $H_m$  为激励磁场强度幅值;  $\omega$  为激励场角频率。则线圈中的感应电动势:

$$E(t) = -NS \frac{dB}{dt} = -NS \frac{dB}{dH} \frac{dH}{dt} = -NS\mu_{rd} \frac{dH}{dt} \quad (2)$$

式中:  $N$  为绕组线圈匝数;  $S$  为磁芯在外部被测磁场方向的截面积;  $\mu_{rd}$  为磁芯物质的微分磁导率。

根据磁饱和特性,当  $|H| > H_s$  (饱和磁场强度) 时,  $\mu_{rd} = \mu$  (磁化曲线饱和段的斜率); 当  $|H| < H_s$  时,  $\mu_{rd} = \mu_d$  (考虑磁芯形状的非饱和物质磁导率)。

当外磁场  $H_0 = 0$  时,  $H(t) = H_m \cos t$ , 在磁饱和作用下,磁感应强度:

$$B(t) = \begin{cases} \mu_d H_m \cos t, & |H| < H_s \\ \mu H_m \cos t + B_a, & |H| > H_s \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $B_a$  为磁化曲线饱和段延长线在  $B$  轴上的截距,显然,  $B(t)$  是对时间轴上下对称的平顶波,根据傅里叶级数分析,它只含奇次谐波不含偶次谐波。

当外磁场  $H_0 \neq 0$  时,  $H(t) = H_0 + H_m \cos t$ ,  $B(t)$  的表达式为:

$$B(t) = \begin{cases} \mu_d H_0 + \mu_d H_m \cos t, & |H| < H_s \\ \mu H_0 + \mu H_m \cos t + B_a, & |H| > H_s \end{cases} \quad (4)$$

这时,  $B(t)$  成为上下不对称的平顶波,根据傅里叶级数分析可知,它不仅含奇次谐波还含有偶次谐波。而由式(2)可知,  $E(t)$  和  $B(t)$  应含有相似的波形成分,因此,可以根据  $E(t)$  的在激励周期内的振幅上下不对称度来检测外磁场  $B_0$ 。

整个过程可以概括为:当磁通门工作时,激励线圈中加载一固定频率、固定波形的交变电流进行激励,使磁芯往复磁化到饱和。在不存在外在被测磁场时,则检测线圈输出的感应电动势只含有激励频率的奇次谐波,波形正负上下是对称的。当存在直流(或低频)外在被测磁场时,则铁芯中同时存在直流磁场和激励交变磁场,直流被测磁场在前半周期内促使激励场使磁芯提前到达饱和,而在另外半个周期内使磁芯延迟饱和。因此,造成激励周期内正负半周不对称,从而使输出电压曲线中出现振幅差。该振幅差与被测磁场成正比,因此可以利用振幅差来检测外在被

测磁场<sup>[4-5]</sup>。

## 1.2 磁探仪系统组成

磁探仪系统框图如图 2 所示。采用 Atmega8L 单片机作为控制核心。外磁场在磁通门探头内经激励信号调制后,经过磁信号放大处理电路取出有用的信号成分,然后通过 A/D 转换形成数字电平存入 ATmega8L 以备计算。取自温度检测电路的数字温度信号直接送给单片机以备后续温度系数校正处理使用。产品出厂前,通过 PC 机及专用的参数配置软件配置好相关的技术参数并安装完成后,以 RS232 串口通信的方式与手持用户终端配套使用。

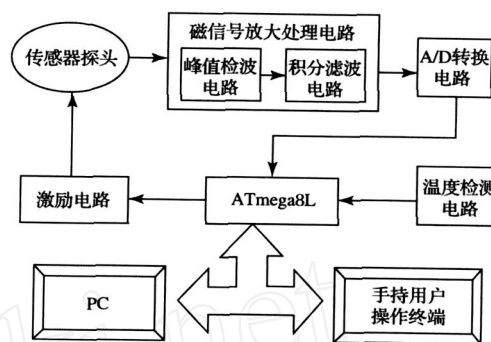


图 2 磁探仪系统框图

## 2 硬件设计

### 2.1 励磁电路

励磁电路如图 3 所示,包括频率源、滤波放大等电路。频率源产生频率稳定的激励信号,激励频率的高低和稳定性很大程度上影响着磁探仪整机的工作性能,频率太高,则会增大噪声;频率太低则会降低传感器的灵敏度,通常,励磁最佳频率会在几百到几千赫兹。另外,找准励磁频率的相对最佳值以及选择合适的激励波形是提高磁探仪性能的关键之一。为配合峰值检波法,设计采用单片机内部编程直接预产生频率为 3 kHz 的方波电平信号,由 Atmega8L 的 PB1 脚即 15 号脚输出,取代了传统由 RC 振荡产生的励磁信号,保证了励磁频率的稳定性。同时,输出

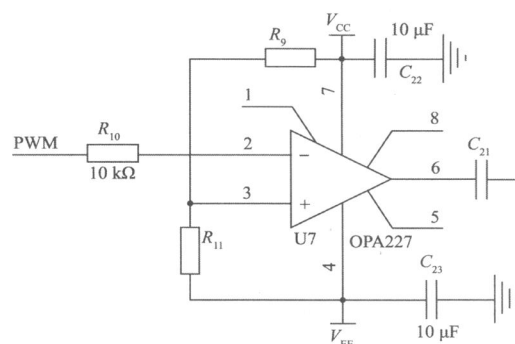


图 3 励磁电路

的方波频率是程序可调的,当磁通门探头更换对最佳激励频率要求产生变化时,可以更方便地对激励频率做出调整。频率源产生的稳定的方波激励信号经滤波放大后由耦合电容  $C_{21}$  送给磁通门探头绕组。另外,此处选用运放对功耗和温度性能有较高要求,故选用了高精度、低噪声、低温漂的 OPA227,并采用双电源供电。

## 2.2 磁信号放大处理电路

电路如图 4 所示,其目的是取出由被测外磁场产生的电信号。由峰值检波电路、积分滤波放大电路和闭环反馈电阻等组成。1、2 号端子分别接磁通门探头的两根引线,

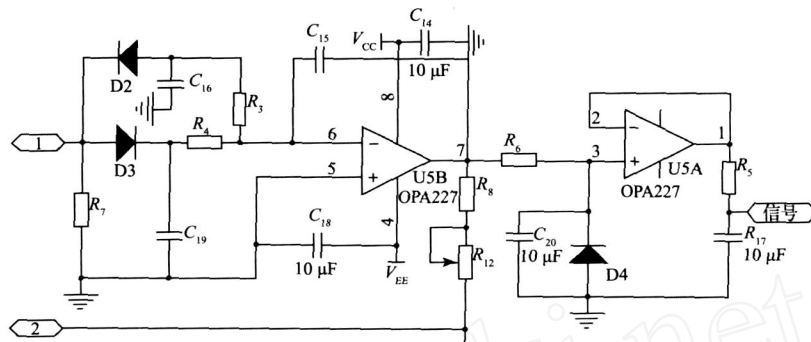


图 4 磁信号放大处理电路

根据前一代的磁探仪产品野外实地使用经验,在本电路中,两个峰值检波二极管和电阻  $R_3$ 、 $R_4$  务必尽量选用一致性较好的器件,否则难于滤掉单纯由激励磁场产生的正负上下对称的信号,这将严重影响峰值检波的性能;另外,在积分滤波环节,尤其要注意积分运放 U5 和积分电容  $C_{15}$  的温度特性和噪声特性<sup>[7]</sup>。设计选用低功耗、低温漂的双路 OPA227 精密运放,一路作为积分滤波用,另一路作为电压跟随用。再者,反馈电阻选用高精度、低温漂电阻,实际上还负责调节系统的增益即系统的灵敏度<sup>[6]</sup>。在阻值的选择上,既不宜过大也不宜过小。过大则达不到深度负反馈的目的,太小则无法满足系统灵敏度的要求,应该根据每个磁通门探头的不同而适当选择。本系统中为 50 k。

## 2.3 温度检测电路

温度检测实际上是一个附加的模块,电路如图 5 所示,它可以适时的为单片机提供系统工作的温度信息。由于现有的材料、工艺技术条件限制,磁通门传感器的温度特性常常难如人意<sup>[2]</sup>。有了这个温度信息,单片机可以根据事先编好的经验算法实时的微调输出信号,从而达到温度补偿的目的。传统的温度检测系统大多采用热敏电阻作为传感器,其必须经过专门的接口电路转换成数字信号后才能由微处理器进行处理,存在可靠性差、成本高、精度低等诸多缺点。系统选用 DALLAS 公司生产的单总线数字温度传感器 DS18B20,它拥有 3 引脚 TO-92 小体积封装形式,温度测量范围为  $-55 \sim +125$ ,可编程为  $9 \sim 12$

被调制后的磁通门信号从 1 号端子经两个对称的检波二极管 D2、D3,电容  $C_{16}$ 、 $C_{19}$ ,电阻  $R_3$ 、 $R_4$  组成的正峰负峰差值检波电路,基本滤掉单纯由激励磁场产生的正负上下对称的信号,得到由外测磁场被调制而产生的脉动的磁通门信号,再经 U5B 和  $C_{15}$  等组成的积分滤波放大电路处理后,得到平滑的直流磁通门信号。为提高系统的抗干扰能力,采用反馈电阻将信号回馈到探头的 2 号端子,形成深度负反馈电路,使线圈绕组始终工作在零场状态下。最后由 U5A 和 D4 等组成的箝位跟随电路将信号送给 A/D 进行采样。

位 A/D 转换精度,温度分辨率可达 0.0625,被测温度用符号扩展的 16 位数字量方式串行输出,完全能够满足系统微型化、低功耗、高性能、抗干扰能力强等要求,使整个系统更加简单可靠。

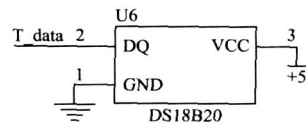


图 5 温度检测电路

## 2.4 A/D 与 MCU 控制电路

A/D 接口与 MCU 控制电路如图 6 所示。系统采用带有自校正功能的二通道  $\Sigma$ - $\Delta$  型 A/D 转换器 AD7705,它运用  $\Sigma$ - $\Delta$  技术实现了 16 位无丢失码性能,并且输出速度在 20 Hz 到 500 Hz,可由指令设定。而单片机则选用 ATMEL 公司高性价比的 ATmega8L,它采用了精简指令集的 RISC 结构,使一条指令可以在一个单独操作中完成,从而实现在一个时钟周期里完成一条或多条指令<sup>[8]</sup>。AD7705 与 MCU 的数据传送通过串行方式进行,可以大大节省端口线。系统设计测量范围为  $0 \sim 65535$  nT,分辨率为 1 nT,故由 LM4040 提供精确的 4.096 V 电压基准,并且用频率 2.048 MHz 的晶振作为主时钟。考虑到只有一路磁通门模拟信号需要转换,故将第二通道接地;为提高系统响应速度,故将 AD7705 的片选信号端 CS 接地,使

其始终工作在选通状态;MCU的PC3口为AD7705提供串行时钟信号,以访问AD7705的串行数据;经过A/D转换后的结果送MCU的PC1口;温度检测模块产生的数字温度信号直接送MCU的PB6口。

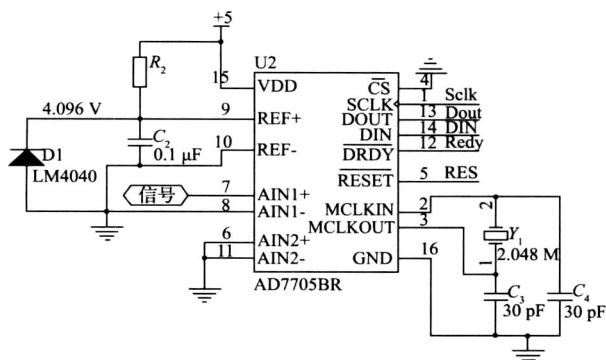


图6 A/D与MCU控制电路

### 3 软件设计

系统的软件采用C语言编写,对单片机进行编程实现各项功能<sup>[9]</sup>。为了方便程序调试和提高可靠性,软件采用模块化结构程序设计方法,主要包括初始化程序、主程序、定时中断服务程序、各子程序模块等。主程序完成系统初始化,读A/D值、读温度值、发数等功能,流程如图7所示。

单片机系统上电后,进入初始化程序,完成片内各模块的设置、清存储单元内容、端口设定等初始化工作。然后进入主程序,读取A/D采样后的磁通门信号值计算转换成磁信号量并存入RAM中,接着读取DS18B20的温度值并存入RAM中。当PC机或手持用户操作终端通过串口通知发送A/D值和温度值时,系统启动中断取出RAM中的相关数据并发送出去。应当指出的是,配套使用的手持

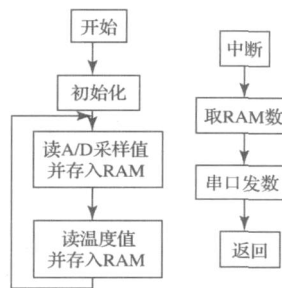


图7 软件设计流程

用户操作终端也是用单片机控制的数字系统,它与ATmega8L构成主从系统。

### 4 实验结果

磁通门磁探仪系统主要关心系统分辨率、灵敏度、测量范围、温度特性和稳定度等。由于当前大部分已投产磁通门磁探仪在分辨率、灵敏度、测量范围上基本都能达到要求,这里着重关注温度特性和稳定度。温度特性实验是在标准无磁实验室内进行的,能够保证非地磁场的干扰不超过1 nT。安装配置好一台磁探仪系统,将其置于恒温箱内,并给定一个标准被测磁场值36 000 nT,调节恒温箱内的温度,观察结果如表1所示。结果表明,温度在0 ~ +40 范围内,误差在±15 nT以内;温度在-10 ~ +60 范围内,误差在±30 nT以内,都达到了误差小于±50 nT的设计标准。

表1 温度实验结果

温度/	磁场/ nT
- 10	36018
- 5	36012
0	36013
10	36012
15	36005
20	36000
25	35999
30	36008
35	36013
40	36012
45	36018
50	35989
55	36015
60	36028

稳定性实验是在湖北宜昌某地磁观测点完成的,该观测点模拟了野外实地不断变换湿度、温度、风力、光照等自然环境。通过国内外多种精密磁探仪测得观测点内地磁 Z 分量长期稳定在 36 000 nT 左右,波动小于  $\pm 5$  nT。将安装配置好的磁探仪置于水平台上,使探头磁芯轴线垂直水平面,并在每天的中午 12:00 整准时记录测量数据。测量结果如表 2 所示。经过 14 天的测量,结果表明,系统第 4 天出现了一个较大的波动,上浮了 38 nT,但依然在设计要求要求的  $\pm 50$  nT 标准之内。

表 2 稳定性实验结果

第 n 天	磁场/nT
1	36002
2	36025
3	36011
4	36038
5	35984
6	35999
7	36034
8	36012
9	36009
10	36023
11	35998
12	35979
13	35992
14	36015

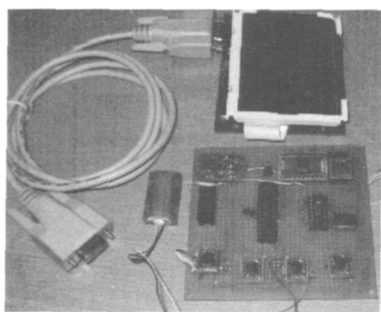


图 8 系统实物图

## 5 结 论

本系统采用新型磁敏元件的单磁芯单绕组磁通门,基于峰差法信号处理电路,由单片机直接产生的数字激磁法,有效改善了传统 RC 模拟激磁电路的温度性能,提高了磁通门输出信号的稳定性,简化了电路设计,降低了整机成本和系统功耗,较好地解决了磁通门使用可靠性和结构复杂性等问题,克服了现有测磁技术在 nT 级弱磁测量上的许多缺陷。本系统硬件结构简单,软件设计灵活,功能强大。实验表明,本系统测量精度、温度特性和稳定度等都达到了预期的设计要求,且成本低廉、调试方便,适用于各种磁探环境,具有较强工程推广价值。针对在实际应用中的激磁回路和测量回路的隔离问题、干扰噪声的抑制问题、漂移失调的补偿问题,将是下一步的研究工作。

## 参 考 文 献

- [1] 张学孚,陆怡良. 磁通门技术[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
- [2] 孙光飞,强文江. 磁功能材料[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [3] 张莹. 基于单片机的数字磁通门传感器[J]. 传感器与微系统,2006,25(7):46-49.
- [4] 石志勇,王怀光,庞发亮. 磁通门信号处理电路分析与设计[J]. 测控技术,2006,25(6):82-88.
- [5] 何乃明. 磁通门探测器的数值计算与仿真[J]. 仪器仪表学报,2002,23(2):157-160.
- [6] 冯文光,刘诗斌. 闭环反馈式数字磁通门传感器[J]. 传感器与微系统,2009,28(9):79-85.
- [7] 谢子殿,朱秀,等. 磁通门信号处理电路的设计与研究[J]. 黑龙江科技学院学报,2003,13(2):46-50.
- [8] 胡汉才. 高档 AVR 单片机原理及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [9] 朱飞,杨平. AVR 单片机 C 语言开发入门与典型实例[M]. 北京:人民邮电出版社,2009.

## 作 者 简 介

瞿少成,1971 年生,博士,副教授,研究方向为智能控制与嵌入式技术。

E-mail: qushaocheng@mail.ccnu.edu.cn.

李文通,1982 年生,硕士,研究方向为智能控制与嵌入式技术。