

# 闭环反馈式数字磁通门传感器

冯文光, 刘诗斌

(西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 针对传统磁通门传感器模拟电路温度性能相对较差的问题, 研究了一种闭环数字磁通门传感器。利用高速 A/D 直接采样传感器信号, 用单片机进行数字信号处理, 再经 D/A 转换输出反馈信号。详细介绍了传感器的硬件结构和软件设计, 并用该传感器对地磁场进行了测量试验。结果显示: 它的零位温度系数为  $6.7 \times 10^{-10} / ^\circ\text{C}$ , 灵敏度温度系数为  $2.5 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ , 线性度达到了  $5.4 \times 10^{-3}$ 。

**关键词:** 数字磁通门传感器; 温度系数; 线性度

中图分类号: TP212.13 文献标识码: B 文章编号: 1000-9787(2009)09-0079-03

## Closed-loop feedback digital fluxgate sensor

FENG Wen-guang LU Shi-bin

(College of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University Xi'an 710072, China)

**Abstract** Aimed at the poor thermal stability of traditional fluxgate sensor, a closed-loop digital fluxgate sensor is presented. The signal of fluxgate is sampled by high-speed A/D directly, handled by microcontroller, and exported the feedback signal through D/A. The hardware structure and software design are described particularly. In order to test these methods, geomagnetic field measurements are carried out using this sensor. The results show that the zero temperature coefficient is  $6.7 \times 10^{-10} / ^\circ\text{C}$ , the sensitivity temperature coefficient is  $2.5 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ , the linearity reaches  $5.4 \times 10^{-3}$ .

**Key words** digital fluxgate sensor; temperature coefficient; linearity

### 0 引言

磁通门是一种具有很好综合性能的弱磁场传感器, 广泛应用于航空、航天、地质勘探等领域。传统磁通门传感器信号处理电路采用模拟电路<sup>[1]</sup>。为了解决模拟电路受温度影响较大的问题, 可采用数字磁通门传感器。这种传感器采用对磁通门输出信号进行采样、用数字信号处理的方法实现原来的模拟电路完成的功能, 改善了传感器的温度性能, 例如: Cerma A 采用基于数字信号处理器<sup>[2]</sup> (DSP) 的闭环反馈电路, Austert H U 采用可编程逻辑门阵列<sup>[3]</sup> (FPGA) 的闭环反馈电路, 及采用单片机<sup>[4]</sup> (SCM) 的开环测量电路等。这些方案没有研究温度对性能的影响, 且开环方式带来的线性度较差, 影响了系统精度。本文设计基于单片机进行闭环方式控制的数字磁通门传感器, 改善其相对温度变化的稳定性, 取得较好的线性度。

### 1 磁通门传感器工作原理<sup>[1]</sup>

磁通门传感器基于磁饱和法原理, 即利用被测磁场中磁铁材料磁芯在交变磁场饱和和激磁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一种方法。单铁芯磁通

门由铁芯外绕激磁线圈 (初级线圈) 和感应线圈 (次级线圈) 组成, 铁芯采用矫顽力小、磁导率很高的合金材料, 其简化的磁化曲线如图 1(a) 所示。实际通常使用双铁芯磁通门, 它是由 2 个参数一致的单铁芯磁通门将初级线圈反向连接、次级线圈同向连接组成。给传感器的初级线圈加上使其深度饱和的激励电流, 受被测磁场影响, 2 个线圈中的磁场不等, 如图 1(b) 所示。相应次级线圈中磁感应强度和感应电势也不同, 如图 1 中的 (c), (d) 所示。由于两次级线圈顺接, 则双铁芯磁通门的最终输出电压信号如图 1(e) 所示。

由图 1 看出: 理想磁通门的输出信号只含有激励磁场的偶次谐波, 其中, 二次谐波分量最大, 幅值与被测磁场在传感器的轴向分量有关, 相位决定了被测磁场的方向, 因此, 磁通门传感器测量电路的功能就是将信号转换成直流电压信号。

通常, 测量电路由选频器、相敏整流和积分器等组成, 示意图见图 2。但模拟电路中的滤波、积分等非线性电路受温度影响大, 输出信号的温度稳定性差, 在开环方式下

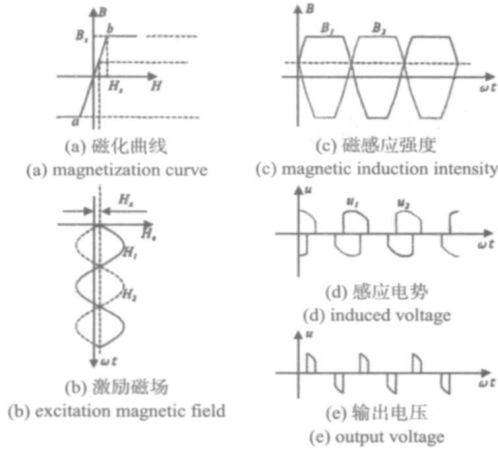


图 1 磁通门工作原理

Tab 1 Working principle of fluxgate

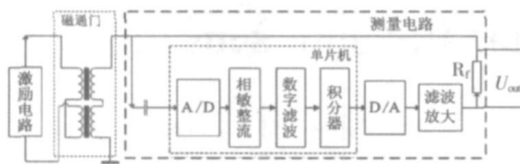


图 2 数字磁通门传感器示意图

Tab 2 Schematic diagram of digital fluxgate sensor

性度较差。本文采用数字测量电路,利用高速 A/D 直接采样磁通门信号,使用单片机进行软件处理。软件处理不受温度影响,提高了整个电路的温度性能。同时,为了减小 D/A 和滤波放大电路非线性的影响,把  $R_f$  两端的电压作为传感器输出信号。

## 2 数字磁通门传感器硬件设计

该数字磁通门传感器如图 2 所示,主要激励电路、信号调理、单片机和信号输出及反馈几个模块组成。

### 2.1 激励电路

为了使输出磁场信号有一定幅度,可使用正弦波、三角波或方波交变磁场激励,使传感器的铁芯的每半个周期都达到深度饱和状态。该传感器采用三角波激励,由微处理器产生的方波直接积分产生,激励频率可通过由微处理器修改方波频率间接调整设定。调节积分电路电阻获得最佳激励电压。

### 2.2 信号调理电路

因为电路中使用的磁通门传感器的反馈线圈和次级线圈是同一线圈,如图 2 因此,反馈电压信号包含在传感器输出信号中。反馈信号为一直流信号,而有用的传感器输出信号的频率则相对较高,为了使反馈信号不随被测信号同时送到采集电路,通常使用隔直电容器和跟随器。且传感器输出信号一般较小,必须使用前置放大器。

本模块利用隔直电容器与同相运算放大器实现隔直和放大功能。电容值较大,一般运放输入电阻  $R$  也很大,因此,截止频率  $f$  较低,形成一个高通滤波器,对被测信号的

影响很小,可忽略不计。调节反馈电阻获得合适的放大倍数。

## 2.3 C8051F064 单片机

系统使用内部包含 A/D 转换器的 C8051F064 单片机,此方法简化电路设计,减小电路体积,缩短程序开发周期,同时,降低了成本。

该单片机是完全集成的混合信号片上系统型 MCU,可以工作在  $-40\sim 85^\circ\text{C}$  范围,片上集成 2 个带 DMA 控制器 16 位、可编程转换速率、最大 1MSPS 的 A/D 转换器。DMA 功能使 A/D 采样需要较少的处理器干预,基本不影响处理器时序。片上高性能的内核和大容量的存储空间可以设计相对复杂的算法,丰富的接口提供了灵活的外设连接。另外,具有片内 JTAG 边界扫描和调试电路,可以进行非侵入式、全速的在系统调试。

## 2.4 信号输出与反馈电路

该模块电路包含 D/A 转换和信号调理两部分。

D/A 转换器采用 TI 公司的 16 位单路电压输出芯片 DAC8551。DAC8551 系列芯片具有超低短时脉冲波形干扰特性,精确度可达 4LSB,低功耗设计,工作温度范围为  $-40\sim 105^\circ\text{C}$ ,满足系统要求。通过低功耗 SPI 串行接口与单片机通信, SPI 总线采用三线工作方式,最大数据传输率是系统时钟频率的 1/2 或 12.5MHz,同时,微处理器利用一个 I/O 口控制 D/A 转换器的输入触发,满足了高速通信需要。

信号反馈部分包括低通滤波和跟随器。RC 低通滤波用来消除 D/A 转换器输出的高频噪声,产生平滑的输出电压。在滤波器后加跟随器增加反馈信号驱动能力,然后,选择合适的电阻器  $R_f$  串联在反馈回路中,增加输出信号的最大幅值。

## 3 数字磁通门传感器软件设计

该系统软件主要完成系统初始化、A/D 采样、数据处理、数据输出等功能,工作流程如图 3 所示。

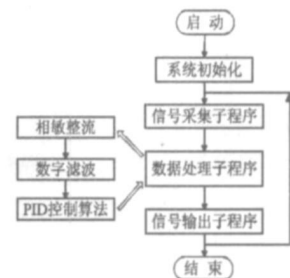


图 3 数字磁通门传感器软件流程图

Tab 3 Software flow chart of digital fluxgate sensor

### 3.1 信号采集子程序

信号采集由 DMA 控制器和定时器共同控制 A/D 转换器完成。写 DMA 指令寄存器,控制逻辑连续存储一个激励周期的采样数据,数据连续存储在片外 XRAM 中。利用定

时器 1 定时启动 A/D 采样, 利用定时器 2 的定时中断重启 DMA 操作, 使 DMA 操作循环执行, 即相当于将 A/D 采样数据连续存储在一环形存储器中。传感器实际输出波形中含较多的高频信号, 因此, 设置的 A/D 转换器采样速率较大, 每个激励周期采样 256 个点。

### 3.2 数据处理子程序

数据处理程序对采样信号进行整流、滤波, 计算偏差信号, 然后, PID 算法进行积分, 得到最终的控制信号。这里, 分别对各部分进行说明。

#### 1) 相敏整流和滤波

当被测磁场符号改变时, 磁通门输出信号相位改变  $180^\circ$ , 因此, 对采样信号整流时要考虑到它的相位, 称为相敏整流。整流时, 需要提供一个外部的相位基准, 一般为与激励信号二次谐波同频率的方波。与传统磁通门处理电路相同, 在方波的正半周期对传感器输出信号进行同向放大, 在方波的负半周期进行反向放大, 区别在于现在处理的是数字信号。如图 4(a) 所示, 采样得到的序列为  $X(n)$  ( $n$  为采样点), 相敏整流基准方波信号为  $R(n)$ , 整流输出信号为  $H(n)$ , 计算关系为

$$H(n) = X(n) \cdot R(n) .$$

由于磁通门内部参数的一致, 实际输出信号中不仅包含偶次谐波, 还含有大量的奇次谐波, 其中, 基波分量很大, 因此, 实际信号通过整流后的波形为图 4(b) 中实线所示。整流输出基本上是单向交流信号, 然后, 进行滤波, 滤波后输出信号如图 4(b) 中的虚线。信号采集每个激励周期采样 256 个点, 程序采用各点求平均值的方法滤波,  $Y(n)$  为滤波后的直流电压信号, 关系式为

$$Y(n) = \frac{1}{256} \sum_{i=1}^{256} H(i) .$$

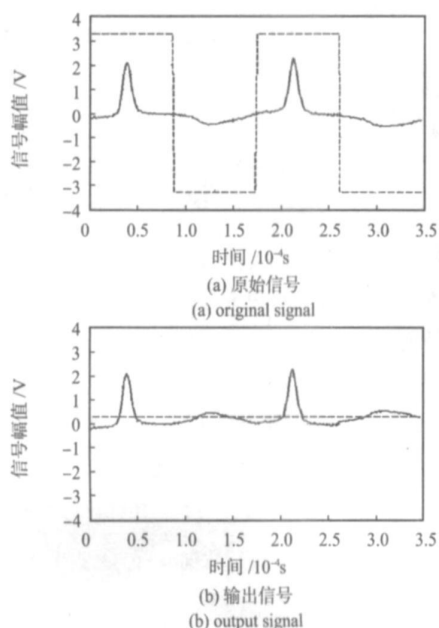


图 4 相敏整流和滤波的信号

Fig 4 Phase-sensitive rectifier and filtering signal

#### 2) PD 控制算法

整个系统的控制功能主要由控制算法实现, 其中, PID 控制满足很多的工业控制要求, 是一种应用最广的控制算法。它将输入偏差信号的比例 (P)、积分 (I)、微分 (D) 通过线性组合计算控制量, 对控制对象进行控制。在使用中这 3 种作用可单独使用或合并使用。本文使用单独的积分控制。

对于数字系统, 算法控制规律近似为

$$u(n) = K_p \frac{T}{T_i} \sum_{i=1}^n e(i) ,$$

式中  $e(i)$  为输入偏差;  $u(n)$  为输出控制量;  $K_p$  为比例系数;  $T$  为采样周期;  $T_i$  为积分时间常数。积分作用的强弱取决于积分时间常数,  $T_i$  越小, 积分作用越强; 反之, 越弱。积分控制保证了输出与输入的无差性。

另外值得注意的是, 用 PD 算法求取控制量  $u(n)$ , 可能使之达到上或下极限而还在继续增加或减小, 但系统内算法总是受到一定运算字长的限制, 大于超出字长的控制量是没有意义的, 因此, 算法对  $u(n)$  进行限幅。

#### 3) 信号输出子程序

控制算法运算的结果  $u(n)$  为系统输出的控制量, 即反馈信号。电路中单片机与 D/A 转换器通过 SPI 串行接口连接。系统只进行简单的数据单向传输, 程序相对简单。规定 SPI 通信协议: 由主器件输出串行时钟, 控制数据传输速率; 发送以字节为单位, 根据所选 D/A 转换器的要求, 定义一帧为 3 个字节, 包含 1 个控制字节和 2 个数据字节; 只需连续向 SPI 数据寄存器写入要发送字节, 即可完成传输。

#### 4 试验结果

试验主要测试该数字传感器的线性度和温度性能。使用高低温试验箱控制温度, 在  $-10 \sim 20^\circ\text{C}$  均匀选择 4 个温度点, 每次温度试验均匀记录 11 个点, 传感器放在无磁转台上对地磁场的水平分量进行测量, 记录数据为传感器输出电压值, 如表 1。

表 1 传感器温度试验数据

Tab 1 Temperature experimental data of sensor

磁场强度 (nT)	-10~20°C 的输出电压 ( $10^4\text{V}$ )			
	-10	0	10	20
31810	9832	9820	9794	9802
28629	8965	8956	8942	8944
25448	8034	8033	8015	8017
22267	7098	7095	7083	7082
19086	6159	6172	6159	6150
15905	5216	5216	5217	5206
12724	4275	4271	4265	4255
9543	3328	3329	3323	3319
6362	2352	2363	2350	2353
3181	1393	1402	1396	1400
0	464	464	462	462

(下转第 85 页)

## 2.5 数据上传模块设计

基站上传数据到计算机通常有 3 种方法可以选择, 1) 通过 RS-232 串口; 2) 通过 USB; 3) 通过网线。由于与 RS-232 串口通信相比, 其他 2 种方法比较容易实现, 而且, 也有助于向基于短信网关的通信模式升级, 从而可以实现更远距离的传输。因此, 系统采用串口的方式与计算机进行连接。基站使用 UART0 连接的 COM 0 口, 通过串口线与计算机相连。

算法 4 数据上传算法:

- 1) 初始化 UART0
- 2) 等待计算机端的发送命令, 有, 则进入 (3);
- 3) 读取 EEPROM 中数据;
- 4) 发送数据到串口;
- 5) 判断是否已全部发送, 否, 则转入 (3), 是, 则进入 (6);
- 6) 发送结束码给计算机端。

基站是采用中断的方式来响应计算机发来的命令, 由于使用的是 UART0 口, 所以, 跟无线通信模块的收发过程类似。基站最后发送的结束码是为了计算机异步读取串口数据时, 提供时间与空间的空隙, 以免最后几位的数据丢失。

计算机端采用 JAVA 语言编写的程序<sup>[8]</sup>, 对基站进行控制, 这里, 使用了 SUN 官方网站提供的 Java Communication API (javax.comm) 对串口进行编程。当计算机端程序点击提取按钮, 计算机就会向基站发送一个提取命令。计算机把基站传来的数据保存到数据库服务器中。程序中主要设计了下面几个函数:

1) 串口初始化函数 public int Initialize(): 本函数初始化所指定的串口并返回初始化结果。如果初始化成功返回 1, 否则, 返回 -1。初始化的结果是该串口被 SerialBean 独占性使用, 其参数被设置为 57600, N, 8, 1。如果串口被成功初始化, 则读取从串口传入的数据, 并将其保存在缓冲区中。

2) 串口读取函数 public String ReadPort( int Length): 本函数从串口 (缓冲区) 中读取指定长度的字符串。参数

Length 指定所返回字符串的长度。

3) 串口发送函数 public void WritePort( String Msg): 本函数向串口发送一个字符串。参数 Msg 是需要发送的字符串。

4) 串口关闭函数 public void ClosePort(): 本函数停止串口检测进程并关闭串口。

## 3 结束语

本文设计的基站系统, 利用了三星 S3C44BOX ARM 处理器高集成度、高运算性、低功耗、低成本等优点, 实现了对水分传感器网络的监控管理。而且, 在实验调试中, 基站系统运行状况良好, 工作稳定, 并在国家“863”项目“水稻精准农业构建与应用示范”中进行初步应用。本系统方案也可推广应用到其他类似传感器网络基站的系统设计中。

## 参考文献:

- [1] 郭卫华, 李波, 张新时, 等. FDR 系统在土壤水分连续动态监测中的应用 [J]. 干旱区研究, 2003, 20(4): 247-251.
- [2] 冶林茂, 吴志刚, 牛素军, 等. GStar2I 型土壤水分监测仪设计与应用 [J]. 气象与环境科学, 2008, 31(3): 82-85.
- [3] 杨丽琴, 赵进创. 基于无线传感器网络的数据采集系统设计 [J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(9): 68-71.
- [4] 李雅, 秦会斌, 徐伟, 等. 一种基于无线传感器网络的火灾信息采集系统 [J]. 电子与封装, 2008, 8(4): 32-35.
- [5] Cao Xianghui, Chen Jintan, Zhang Yan. Development of an integrate wireless sensor network micro-environmental monitoring system [J]. ISA Transactions, 2008(47): 247-255.
- [6] 陈艳华, 候安华, 刘盼盼, 等. 基于 ARM 的嵌入式系统开发与实例 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.
- [7] Pantazis N A, Vergados D J, Vergados D D. Energy efficiency in wireless sensor networks using sleep mode TDMA scheduling [J]. Ad Hoc Networks, 2009(7): 322-343.
- [8] 张思民, 梁维娜. JAVA 程序设计实践教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

## 作者简介:

缪嘉敏 (1984-), 男, 广东东莞人, 硕士研究生, 研究方向为无线传感器网络。

(上接第 81 页)

由表 1 看出: 传感器存在明显的零位误差, 分析误差主要来源于安装误差。除去安装误差后, 计算得线性度为  $5.4 \times 10^{-3}$ 。零位温度系数为  $6.7 \times 10^{-10} / ^\circ\text{C}$ , 灵敏度温度系数为  $2.5 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ , 表明数字磁通门传感器具有较好的线性度和很小的温度误差。

## 5 结论

为了改善传统磁通门受温度影响大的不足, 本文设计了基于单片机的数字磁通门传感器。试验表明: 采用闭环控制, 取得了较好的线性度; 利用数字电路代替模拟电路, 改善了传感器的温度性能。且使用单片机降低电路成本, 是一种有效的解决方案。

## 参考文献:

- [1] 刘诗斌. 微型智能磁航向系统研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2001.
- [2] Cerman A, Ripka P. Towards fully digital magnetometer [J]. Sensors and Actuators A, 2003(106): 34-37.
- [3] Austert H U. Concept and first results of a digital fluxgate magnetometer [J]. Measurement Science and Technology, 1995(6): 477-481.
- [4] 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.

## 作者简介:

冯文光 (1983-), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 研究领域为智能传感器、数据处理与数据融合等。