

数字式无线微弱磁场测量装置设计

邓鑫林¹, 牛红涛², 隋良红², 李兴贵³, 郭乃理²

(1. 四川大学 制造科学与工程学院, 成都 610065; 2. 中国测试技术研究院, 成都 610021;

3. 四川中测电子科技有限公司, 成都 610052)

摘要: 为了监测周围环境的微弱磁场强度, 设计了一款基于 STM32 单片机的数字式无线微弱磁场测量装置, 并系统地介绍了其硬件电路设计与软件设计原理; 利用磁阻传感器感应微弱磁场信号, 输出的差分电压经过预处理电路调理放大后, 送入 A/D 采集模块进行模数转换, 转换后的数字信号经过单片机误差补偿、多个数据平均、运算等处理后送与 LCD 显示, 并将数据通过蓝牙模块无线传输给上位机; 实验结果表明, 该磁场测量装置的测量范围为 ± 6 Gs, 分辨率为 $120 \mu\text{Gs}$; 通过对测量装置的标定实验与不确定度分析, 验证了装置具有测量精度较高和性能稳定的特点; 此外, 相比于国内外其它检测精度更高、检测范围更广的电磁场检测仪器, 该磁场测量装置具有价格低廉, 更适用于普通大众对电磁场的检测需求。

关键词: STM32; 磁阻传感器; 蓝牙通讯; 不确定度分析

Design of Digital Wireless Measuring Device for Weak Magnetic Field

Deng Xinlin¹, Niu Hongtao², Sui Lianghong², Li Xinggui³, Guo Naili²

(1. School of Manufacturing Science & Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. National Institute of Measurement and Testing Technology, Chengdu 610021, China;

3. Sichuan Zhongce Electronic Technology Co., Ltd., Chengdu 610052, China)

Abstract: A digital wireless measuring device based on STM32 MCU is designed for the weak magnetic field intensity detecting. The principle of hardware circuit design and software design is introduced systematically. The signal of weak magnetic field is induced by magneto-resistive sensor. After the differential voltage is amplified by pre-processing circuit, the voltage signal is sent to the AD acquisition module. The converted digital signal is processed by single-chip microcomputer, including error compensation, multiple data averaging, arithmetic and LCD display. The data is transmitted to PC via the Bluetooth. The experimental results show that, the measuring range of the magnetic field measuring device is ± 6 Gs, and the resolution is $120 \mu\text{Gs}$. The advantages of high accuracy and stable performance of the measurement device is validated by the calibration experiment and uncertainty analysis. In addition, compared with other electromagnetic detecting instruments which have higher detection accuracy and wider detection range at home and abroad, the magnetic field measuring device has low price. And it is more suitable for the general public's demand for electromagnetic field testing.

Keywords: STM32; magneto-resistive sensor; bluetooth communication; uncertainty analysis

0 引言

当前社会下, 随着电动汽车的快速发展与推广以及手机、电脑等电子产品的盛行, 它们所带来的电磁场辐射问题近年来受到了人民群众的广泛关注, 所以民用电磁场检测仪器成为了一种市场需求^[1]。市场上大多数电磁场检测设备是国外研制的, 一般电磁场检测设备是采用光纤作为信号传输的媒介。但是由于光纤传输涉及的光电转换设备比较昂贵, 不适合普通大众对电磁场检测设备的低廉要求。另一方面, 磁场测量装置与电脑通信若采用导线连接, 则电缆上的信号易受到电磁场的干扰, 使得测量不准确。所以, 磁场测量装置采用蓝牙无线传输。这样, 磁场测量装置便可以与手机、电脑进行蓝牙无线通讯, 也可以跟蓝牙打印机匹配后将磁场测量值打印出来^[2]。

本文选用磁阻传感器来感应被测磁场强度, 具有灵敏度高、低功耗、低成本的优点。基于各向异性磁阻效应的磁阻传感器正逐渐被应用在磁场强度测量、磁定位以及转速测量、地

磁场监测等领域^[3-4]。根据对电动汽车内部磁场强度检测需求分析, 确定了磁场测量装置的最低设计参数: 磁场强度检测范围为 ± 2 Gs, 分辨率为 0.01Gs 。通过本文研究, 希望能够设计出成本低廉、高灵敏度、高可靠性的智能化电磁场监测仪器。

1 硬件设计

1.1 系统总体设计

图 1 为装置的系统总体设计框图。磁场测量装置采用基于 ARM 内核的 32 位处理器 STM32F103 作为主控制芯片。利用单片机的定时器产生 PWM 给置位/复位电路, 当置位复位电路供电电压为 5 V, 可以输出时间超过 $2 \mu\text{s}$ 电流值超过 500 mA 的电流脉冲给磁阻传感器 HMC1052 的引脚 SR+, 引脚 SR- 接地^[5]。这样可以保证磁阻传感器不受外界强磁场的干扰, 始终保持较高的灵敏度。调理放大电路主要是对磁阻传感器输出的微弱电信号进行滤波并放大。由于磁阻传感器采用的是电桥电路原理, 输出的是差分电压, 所以放大电路采用了 AD620 差分放大电路。AD7606 多通道同步采集模块负责采集多路磁阻传感器输出经调理放大后的信号, 将模拟信号转换为数字信号^[6-7]。STM32 单片机采用可变静态存储控制器 (FSMC) 与 A/D 采集模块交互信息, 实现对数字信号的运算

收稿日期: 2017-07-05; 修回日期: 2017-08-02。

基金项目: 四川省科技计划项目(2015GZ0163, 2016GZ0023)。

作者简介: 邓鑫林(1991-), 男, 四川绵阳人, 硕士研究生, 主要从事智能仪器设计及应用的研究。

处理。此外, 单片机通过直接存储器访问方式 (DMA) 将信息送到缓冲区, 通过串行外设接口 (SPI) 与看门狗电路、EEPROM 通讯。单片机将磁场信息送与 LCD 显示, 并通过 HC-05 蓝牙模块与上位机进行无线通讯。整个系统在测量时能耗要求较低, 采用可充电型锂电池供电。

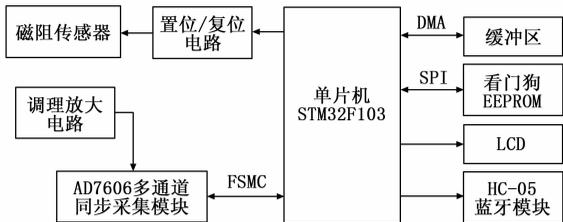


图 1 系统总体设计框图

1.2 磁场测量电路设计

磁阻传感器测量磁场的原理: 由 4 个薄膜合金 (等效于可变电阻) 搭接而成的四臂差动电桥, 当有外加磁场变化时, 电桥四臂电阻发生变化, 输出差分电压^[8]。HMC1052 双轴磁阻传感器是霍尼韦尔公司设计生产的高灵敏度、低磁滞传感器, 其灵敏度为 1 mV/V/Gs, 磁场测量范围为 ± 6 Gs。

如图 2 所示, 磁场测量电路主要由置位/复位电路、磁阻传感器、RC 滤波电路和 AD620 差分放大电路组成。

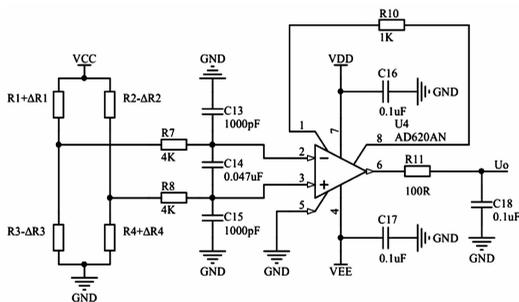


图 2 磁场测量电路

1.3 差分放大电路设计

当对磁阻传感器提供 5V 电源时, 传感器能将任何入射在敏感轴方向上的磁场强度转换成差分电压输出^[9]。输出的差分电压经过 RC 滤波后再送入 AD620 差分放大电路。由于传感器输出的电压信号十分微弱, 为了方便 A/D 转换模块对信号的采集, 需要对输出的差分电压信号进行差分放大^[10]。如图 2 所示, 差分放大电路选用低功耗、高性能的 AD620 仪表放大器实现, 采用 ± 5 V 双电源供电, 具有良好的线性放大性能, 当放大倍数 $G = 50$ 时精度可达 0.15%。AD620 放大倍数由磁阻传感器输出电压范围和 A/D 转换模块采集信号范围共同决定。

如图 2 所示, AD620 的引脚 1 和 8 之间连接一个 $R_G = 1 \text{ k}\Omega$ 的电阻来调节放大倍数, 则放大倍数为:

$$G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{R_G} + 1 = 50.4 \quad (1)$$

引脚 7 接 +5 V 电源, 引脚 4 接 -5 V 电源, 电源均通过电容接地, 从而保持电源电压稳定。参考电压端引脚 5 接模拟地。传感器输出的差分电压从引脚 2 和引脚 3 输入, 放大后的电压由引脚 6 输出, 并经过 RC 低通滤波后送入 A/D 采集模块。磁场测量电路的输出电压在 A/D 转换模块采样范围内,

从而传感器输出的微弱信号得到了足够放大, 并保留了一定的采样空间。

1.4 磁阻传感器置位/复位电路设计

置位/复位电路是专为磁阻传感器保持高灵敏度而设计的, 能够对传感器的磁场感应轴施加一个短时间、高强度的恢复磁场, 从而使传感器长时间工作在高灵敏度状态下。磁阻传感器置位/复位电路如图 3 所示, 利用单片机产生 PWM 信号从 P1 口输入, 通过高低电平来控制置位/复位电路, 电路输出接 SR+, SR- 接地。其工作原理如下: 当 P1 口输入为低电平时, 三极管 Q1 导通、Q2 截止, 电源 VCC 通过电阻 R12 给电容 C22 充电, 极性电容 C19 通过放电给电容 C22 充电, 最终使电容 C22 的两端电压趋于 +5 V; 当 P1 口输入为高电平时, 三极管 Q2 导通、Q1 截止, 电容 C22 放电至零电压, 同时 VCC 给 C19 充电至 +5 V。

HMC1052 磁阻传感器的每一个置位/复位带标称电阻为 4.5 Ω, 在置位和复位时需要的峰值电流为 0.5 A, 电流持续时间要超过 2 μs。在置位/复位电路中, 由单片机产生的脉冲周期为 8 ms, 远大于电流所需要的持续时间。通过示波器观察电路输出的脉冲波形, 可以看到脉冲峰值电流大于 1 A, 脉冲持续时间超过 2 μs, 故该置位/复位电路能够有效对磁阻传感器进行置位和复位。

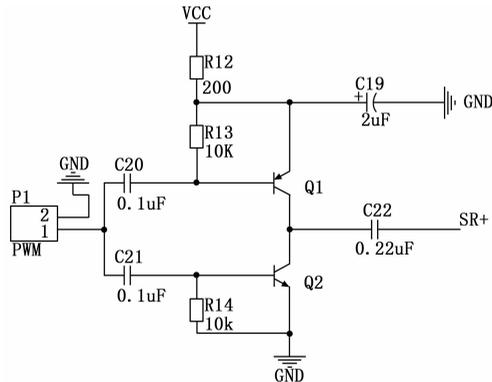


图 3 磁阻传感器置位/复位电路

1.5 AD7606 多通道同步采集模块

模数转换芯片选用的是 AD7606 芯片, 它是一款 16 位、8 通道同步采样模拟数据采集芯片。芯片内置了模拟输入钳位保护、二阶抗混叠滤波器、跟踪保持放大器、16 位电荷再分配逐次逼近型模数转换器 (ADC)、灵活的数字滤波器、2.5 V 基准电压源、基准电压缓冲以及高速串行和并行接口。AD7606 采用 +5 V 单电源供电, 可以处理 ± 10 V 和 ± 5 V 真双极性输入信号, 同时所有通道均能以高达 200 KSPS 的吞吐速率采样。由于信号调理放大电路将传感器输出信号放大在 ± 5 V 范围内, 故 AD7606 采用 ± 5 V 输入模式采样。

1.6 蓝牙通信模块设计

磁阻传感器能够感应的最低频率磁场是直流磁场, 而感应的磁场最高频率为 5 MHz, 本文所设计的磁场测量装置主要用于检测直流磁场与工频磁场。需要说明的是, 蓝牙无线通讯使用的是 2.4 GHz 频率, 对磁阻传感器检测低频微弱磁场几乎没有影响。磁场测量装置跟 PC 或者手机之间选用蓝牙进行无线通讯, 一方面是为了避免繁琐的电缆连接, 另一方面是为

为了避免电缆上的传输信号在被测电磁场中受到干扰导致测量不准确^[11]。所以将磁场测量装置内置蓝牙模块，可以跟电脑或者手机实现蓝牙通讯，将磁场测量数据传输到电脑或者手机上，实时监测被测磁场强度。本文蓝牙模块选择的是专为智能无线数据传输而打造的 HC-05 蓝牙模块，它具有体积小、功耗低、收发灵敏性高等优点，并支持 UART、USB、SPI 等接口，适用于短距离无线传输领域，其通讯距离一般为 10 米^[12]。

HC-05 蓝牙模块的 3.3 V 电源管脚可以与 STM32 单片机共用 3.3 V 电源，其 GND 管脚接模拟地。蓝牙模块的串口数据输出管脚 TXD 和串口数据输入管脚 RXD 分别连接单片机的串行输入管脚 PA10 和串行输出管脚 PA9。蓝牙模块上配置的控制管脚 KEY 连接到单片机的 PA0 管脚，使单片机能够检测到模块的按键状态。单片机的 PA1 管脚连接 HC-05 的 LED 管脚，用于监测蓝牙模块的配对状态，当输入为高电平时说明配对成功，当输入为低电平时说明配对失败^[13]。

2 软件设计

磁场测量装置的软件设计流程图如图 4 所示。仪器开机首先进行程序初始化，为了保证 ADC 的采样精度，需要对 ADC 进行校准。单片机利用定时器输出 PWM 给置位/复位电路，来避免磁阻传感器的灵敏度受到外界强磁场的干扰。AD 采集开始，不断将获取的数据通过 I/O 口送入单片机，对数据进行误差补偿后计算出相应的磁场强度值。最后，单片机将运算得到的磁场强度值送与 LCD 实时显示，并通过蓝牙模块无线传输给电脑或者手机。当装置设定为连续监测模式时，程序便不断循环，否则测量结束。其具体实现方式为：

- 1) 由 STM32F103 单片机产生 PWM 脉冲信号送入置位/复位电路中，电源电压 VCC 提供 5 V 电压，置位/复位电路便能产生超过 1A 的瞬时电流，能够有效地置位/复位传感轴，保证磁阻传感器始终具有较高的灵敏度。
- 2) 单片机 I/O 端口接收 AD7606 采集的磁场信号：磁阻传感器感应被测磁场信号输出微弱差分电压经 AD620 仪表放大器差分放大后输入 AD7606 多通道同步采集模块，单片机可同时读取多路信号。
- 3) 单片机对转换后的数字信号进行误差补偿、多个数据平均、运算等处理，最后换算成对应的磁场强度。
- 4) 单片机将磁场强度值送与 LCD 显示：送显前，首先要判断所测磁场强度是否超过量程，如果超过了量程，则进行错误显示，单片机做复位处理。
- 5) 单片机将磁场数据通过蓝牙模块无线传输给上位机：将蓝牙模块设置为自动连接工作模式时，模块将会自动根据事先设定的方式连接进行数据传输。具体步骤为：传输前，首先通过单片机输出信号启用蓝牙模块，自动进行配对连接；判断蓝牙配对成功后，将数据按照通信协议进行传输；最后判断数据传输是否成功。
- 6) 判断测量装置是否为连续监测模式：当判断出测量装置处于连续监测模式时，程序不断循环，单片机不断将监测得到的磁场强度数据送与 LCD 显示，并传输给上位机；否则测量结束，测量装置进入待机状态。

3 蓝牙无线通信功能

磁场测量装置要通过蓝牙模块与电脑、手机进行无线通

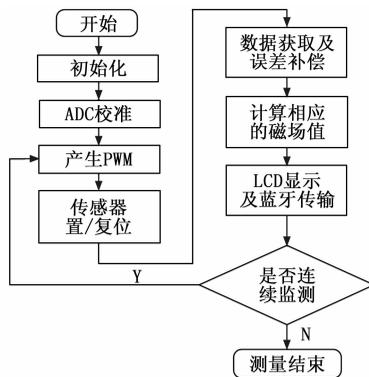


图 4 软件设计流程图

讯，其前提是要先进行蓝牙配对。HC-05 蓝牙模块的设置，可以通过发送简单的 AT 指令来进行操作，比如通过发送“AT+NAME=LANYA”可以设置蓝牙的名称为“LAN-YA”。此外还需要设置蓝牙配对密码和通信波特率等。当数据接收端是手机时，手机上需要下载安装一个蓝牙串口助手软件，打开软件搜索周围蓝牙设备，找到“LANYA”输入正确的密码，几秒钟便能配对成功，然后就能接收从磁场测量装置发送的数据了。当数据接收端是电脑时，可以利用蓝牙转串口模块实现通信，即先用蓝牙模块接收数据，再用串口线与电脑进行通信^[14]。所以，电脑上可以使用串口助手来显示和管理接收的数据信息。

4 磁场测量装置标定实验与不确定度分析

在标定实验中，采用对亥姆霍兹线圈通电流来产生标准磁场。如图 5 所示，亥姆霍兹线圈是由一对半径为 R ，匝数均为 N ，相互平行且同轴放置的圆形线圈同向串联组成，这对线圈的距离为 $O_1O_2 = R$ 。这对线圈中心处的合成磁感应强度为：

$$B = \frac{8\sqrt{5}\mu_0 NI}{25R} \quad (2)$$

其中： N 为线圈匝数， I 为线圈中电流大小， μ_0 为一个已知系数。

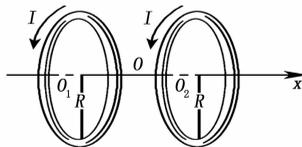


图 5 亥姆霍兹线圈原理图

当对亥姆霍兹线圈通以直流电流时，这对载流线圈在轴线中心点处将产生较大范围的匀强磁场，调整电流大小 I 可以得到不同的标准磁场强度。将磁场测量装置放置在亥姆霍兹线圈中心点的平台上便可进行标定实验。测试中，记录下亥姆霍兹线圈产生的标准磁场强度以及当前磁场测量装置 A/D 模块采集到的电压大小，从而建立标准磁场强度与装置输出电压的关系。

HMC1052 为双轴磁阻传感器，在实验中只对 A 敏感轴作了标定，与其正交方向上的 B 敏感轴输出的电压大小几乎为零。如图 6 所示，实验选择的标准磁场强度范围为 0~6 Gs，

并在磁场强度整数点处对磁场测量装置输出电压做了采样, 最后将实验获得的数据线性拟合。可以得到, 标准磁场强度与磁场测量装置输出电压之间的线性拟合式为:

$$B = 3.955U - 0.2028 \quad (3)$$

其中: B 为标准磁强强度, 单位为 Gs; U 为磁场测量装置输出电压, 单位为 V。

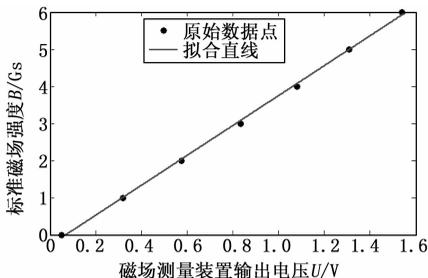


图 6 标准磁场强度与磁场测量装置输出电压的关系

当确定被测磁场强度与输出电压的线性关系式后, 再对标准磁场强度为 6 Gs 时进行测量, 并做不确定度分析:

1) 在标准磁场强度为 6 Gs 时, 磁场测量装置测量得到 6 个数据, 如表 1 所示。

表 1 磁场测量装置在 6 Gs 时测量所得数据

序号 n	1	2	3	4	5	6
强度 B_i /Gs	5.8 757	5.8 767	5.8 782	5.8 893	5.8 917	5.8 737

计算 6 次测量数据的平均值 $\bar{B} = 5.8 809$ Gs。

2) 不确定度评定: 分析测量装置的系统总体设计框图可知, 对磁场强度测量的不确定度影响显著的因素主要有: 磁场强度的测量重复性引起的不确定度 u_1 ; 传感器非线性引起的不确定度 u_2 ; AD620 放大器在增益为 50.4 倍时的增益误差引起的不确定度 u_3 。其中, 不确定度 u_1 采用 A 类评定方法, 不确定度 u_2, u_3 采用 B 类评定方法。此外, 由于 AD7606 采集模块是 16 位模数转换模块, 其量化误差为 μ V 级, 可以忽略不计。

(1) 磁场强度的测量重复性引起的不确定度分量:

采用 A 类方法评定, 用贝塞尔公式计算得到单次测量的标准差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (B_i - \bar{B})^2}{6 - 1}} = 0.0076 \text{ Gs}$$

采用平均值作为最佳估计值, 故由重复性引起的不确定度分量由下式计算得到:

$$u_1 = \sigma_{\bar{B}} = \frac{\sigma}{\sqrt{6}} = 0.0031 \text{ Gs}$$

(2) 传感器非线性引起的不确定度分量:

根据传感器说明书, 在被测磁场强度为 ± 6 Gs 时传感器的线性误差是量程的 1.8%。传感器的分辨率为 1 mV/V/Gs, 传感器加载电压为 5 V, 传感器的最大测量范围为 ± 6 Gs, 故传感器的满量程输出电压为 30 mV。所以在测量 6 Gs 磁场强度时, 传感器输出电压的线性误差为 ± 0.54 mV。按均匀分布处理, 取 $k = \sqrt{3}$, 又传感器输出信号被放大 50.4 倍后进行采样, 则由传感器非线性引起测量装置输出电压的标准不确定度为:

$$u_{传} = \frac{0.54}{\sqrt{3}} \times 50.4 = 15.7132 \text{ mV}$$

故由传感器非线性引起的不确定度为:

$$u_2 = \left| \frac{\partial B}{\partial U} \right| u_{传} = 3.955 \times u_{传} = 0.0621 \text{ Gs}$$

(3) AD620 放大器在增益为 50.4 倍时的增益误差引起的不确定度分量:

根据 AD620 放大器说明书, 在增益为 50.4 倍时放大器增益误差为 0.15%, 其中 6 次测量的电压平均值为 $\bar{U} = 1.5 382$ V, 所以放大器的增益误差范围为 $\pm 0.0 023$ V。按均匀分布处理, 取 $k = \sqrt{3}$, 则 AD620 放大器在增益为 50.4 倍时的增益标准不确定度 $u_{放} = \frac{0.0023}{\sqrt{3}} = 0.0 013$ V, 故 AD620 放大器在增益为 50.4 倍时的增益误差引起的不确定度分量为:

$$u_3 = \left| \frac{\partial B}{\partial U} \right| u_{放} = 3.955 \times u_{放} = 0.0 051 \text{ Gs}$$

3) 不确定度合成

因为不确定度分量 u_1, u_2, u_3 相互独立, 计算磁场强度测量的合成标准不确定度为:

$$u_c(B) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.0624 \text{ Gs}$$

4) 扩展不确定度的评定

取包含因子 $k = 2$, 则磁场强度测量的扩展不确定度:

$$U(B) = k \times u_c(B) = 0.1248 \text{ Gs}$$

依据“三分之一准则”对扩展不确定度进行修约, 得扩展不确定度 $U(B) = 0.13$ Gs。

5) 不确定度报告

磁场强度测量的不确定度报告:

$$\bar{B} = 5.88 \text{ Gs}, U(B) = 0.13 \text{ Gs}, k = 2$$

当用扩展不确定度评定磁场强度测量的不确定度时, 磁场测量装置在标准磁场强度为 6 Gs 时的测量结果为 $B = (5.88 \pm 0.13)$ Gs。根据对磁场强度测量的不确定度分析结果可知, 可以分别从硬件与软件上对磁场测量装置进行误差补偿, 来提高其测量准确度, 使其能够满足一般微弱磁场测量的需求。

5 结束语

设计的数字式无线微弱磁场测量装置的磁场强度测量范围为 ± 6 Gs, 分辨率为 120 μ Gs, 达到了预先制定的设计要求。磁场测量装置在检测微弱磁场时, 采用了以下措施来抑制噪声与干扰: 磁阻传感器采用全桥电路的原理, 可以改善非线性, 自动进行温度误差补偿; 测量装置采用差分放大电路, 有利于抑制共模干扰 (提高电路的共模抑制比) 和减小温度漂移; 为了避免通信电缆上的传输信号在被测电磁场中受到干扰引起测量不准确, 磁场测量装置跟 PC 或者手机之间采用蓝牙无线通讯。本文介绍了磁场测量装置的软硬件设计原理, 蓝牙无线通讯的配置方法, 通过标定实验与不确定度分析验证了装置的性能。后期可以根据需要, 针对手机或者电脑开发相应的蓝牙无线终端数据接收和管理系统, 在界面上实时显示被测磁场强度的波形及数据等信息。

参考文献:

[1] 陈青松, 李 涛, 黄汉林, 等. 极低频电磁场职业接触限值研究概况 [J]. 中国职业医学, 2011, 38 (1): 72-74.