

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2517888

纳特级三维微弱磁场测量装置的研制*

吴庆州 吴一凡 田晓锐 张锦涛

(南京理工大学紫金学院 南京 210033)

摘要: 针对市面上弱磁场测量装置成本高、精度欠佳及灵活性受限等问题,采用 PNI 磁场测量技术,研制了一款以 RM3100 为核心传感器的三维磁场测量装置,其能够进行 nT 级磁场强度的测量。该装置以 ESP32 为主控芯片融合现代通信技术与云服务技术,控制舵机模块、蓝牙模块、WiFi 模块、显示模块,实现了测量数据的装置端与 PC 端的实时同步显示,三维移动平台的手机近距离精准控制,拓展了装置的灵活性与应用场景。实验结果表明,利用此装置测量得到地磁场的大小为 $28.93 \mu\text{T}$,其测量范围覆盖 $\pm 800 \mu\text{T}$,误差在 5% 以内,最小测量精度为 10 nT。该装置具有低成本、高精度、灵活性高、操作简单等特点,可用在物理课堂演示、实验教学、无损检测等多个领域,具有良好的应用前景。

关键词: 微弱磁场;ESP32;通信技术;云服务;物理仿真;通电螺线管

中图分类号: TN602 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Design and development of a Nat-level three-dimensional weak magnetic field measurement device

Wu Qingzhou Wu Yifan Tian Xiaorui Zhang Jintao

(Nanjing University of Science and Technology ZiJin College, Nanjing 210033, China)

Abstract: In response to the issues of high cost, inadequate accuracy, and limited flexibility of weak magnetic field measurement devices available on the market, a three-dimensional magnetic field measurement device has been developed using PNI magnetic field measurement technology, centered around the RM3100 sensor. This device is capable of measuring magnetic field strengths at the nT level. Utilizing an ESP32 as the main control chip, it integrates modern communication technologies and cloud services to control servo modules, Bluetooth modules, Wi-Fi modules, and display modules, enabling real-time synchronous display of measurement data on both the device and PC, as well as precise close-range control of a three-dimensional mobile platform via a mobile phone. This enhances the device's flexibility and potential application scenarios. Experimental results indicate that the device measures the Earth's magnetic field strength to be $28.93 \mu\text{T}$, with a measurement range covering $\pm 800 \mu\text{T}$ and an error margin within 5%, while achieving a minimum measurement precision of 10 nT. The device is characterized by low cost, high precision, great flexibility, and ease of operation, making it suitable for various fields such as physics classroom demonstrations, experimental teaching, and non-destructive testing, with promising application prospects.

Keywords: weak magnetic field; ESP32; communication technology; cloud service technology; physical simulation; electric solenoid

0 引言

现代科技下,微弱磁场测量在许多不同的应用领域中都具有重要意义。在地球物理学中常用于探测地壳运动和磁场变化,测量的磁场强度在 $10^{-7} \sim 10^{-9} \text{ T}^{[1-2]}$;在材料科学领域常用于研究磁性材料的磁化曲线和磁滞回线,测量的磁场

范围在 $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{ T}^{[3]}$;在工业无损检测常用于检测金属结构内部的缺陷和损伤,测量的磁场范围在 $10^{-5} \sim 10^{-7} \text{ T}^{[4-5]}$ 。这些应用领域展现了微弱磁场测量的多样性与重要性。

近年来,国内外科研工作者在微弱磁场测量研究中,取得了一些重要成果。利用霍尔效应原理的磁场测量装置广泛用于电力系统中的电流测量和磁场定位^[6-8];基于光纤传

传感器技术则被广泛用于地质勘探中的地下磁场测量和监测^[9-10]。这些技术的不断创新和应用推动了微弱磁场测量领域的发展,为微弱磁场测量提供了参考方案。例如,白鹏鹏^[11]基于光纤环衰减技术的锥形光纤,通过磁场强度变化引起的光损耗差异,建立了系统衰减时间与磁场强度的相关性,实现了 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ T 范围内的弱磁场测量,但是该装置中所用到的 DFB 激光器,光隔离器等器件的价格偏高,推广难度大,且装置的传感单元长度较长,导致整体灵活性降低,无法测量狭小空间的磁场强度;万世荣等^[12]结合亥姆线圈,利用霍尔效应设计了一种平面磁场测量装置,其测量的磁场强度精度为 10^{-6} T,但是该装置受其传动系统限制,传感单元只能进行 X-Y 两个方向的位移,无法实现传感单元在三维空间内的精准定位和测量;顾锐峰等^[13]基于新开发的多路 ADC+FPGA 数据采集平台,结合 4 路霍尔传感器和 1 路直流电流传感器的信号融合,设计了一种利用卡尔曼滤波实现磁场高精度测量的多传感器融合算法,精度为 10^{-6} T,虽然可以实现磁场测量,但整体系统设计较为复杂。上述的研究中,磁场测量装置与电脑若采用导线连接,则导线上产生的电磁场易对测量过程产生干扰,测量精度难以进一步提高,导致他们的装置均无法测量到纳特级。

针对上述装置中存在的问题,本文设计了一种三维微弱磁场测量装置,其传感单元尺寸为 $13 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$,结合自制的三维移动平台,实现了传感单元在三维空间内的精准定位与测量,拓展了应用场景。利用云服务与蓝牙传输技术,使该装置实现数据远程传输与近距离控制功能,通过程序控制实现了磁场采集与数据传输交替进行,避免了装置中的 WiFi、蓝牙信号对测量结果产生影响,进而提升了测量精度,达到了 10^{-8} T。

1 系统整体设计

本文设计的微弱磁场测量装置以 ESP32-S3-DevKitc-1 作为主控,其余硬件由 RM3100 传感器和 RP8-45 舵机等构成。RM3100 磁传感器将捕捉到的数据通过 SPI 通信传输至主控板,系统的总体框图如图 1 所示。在主控板中通过数据预处理模块对原始数据进行滤波与输出,并计算出总的磁场强度 H ,实现对纳特级磁场的稳定测量。处理后的 X 轴、Y 轴、Z 轴数据以及总的磁场强度 H ,会在装置上的 OLED 屏幕上实时显示,同时通过主控板内置的 WIFI 通信模块,借助 MQTT 协议将上述数据实时传送至云服务端,实现数据可视化。用户可通过智能手机等移动设备,利用蓝牙无线通讯协议与主控板蓝牙建立连接,实现对装置三维移动平台的近距离精准控制,减小因手动控制装置而对测量结果产生的影响。

2 系统硬件设计

2.1 主控芯片和外围电路设计

为了使研制的设备在运行过程中能够降低功耗的同时

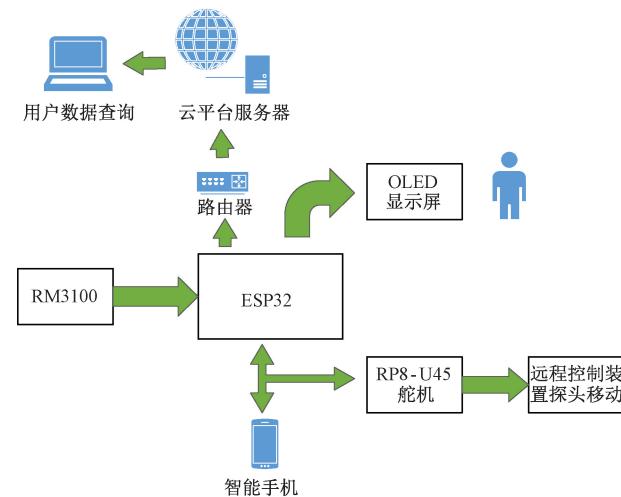


图 1 系统总体框图

Fig. 1 Overall system diagram

完成数据采集与处理、数据传输、近距离控制等功能,所以在选择主控模块时要考虑低功耗与高性能需求,本装置最终采用 ESP32-S3-DevKitc-1 开发板为整个系统的运行核心,ESP32 具备载 Xtensa[®] 32 位 LX7 双核处理器,主频高达 240 MHz,内置高集成度的低功耗 Wi-Fi 系统级芯片,专为物联网、移动设备、可穿戴电子设备等各种应用而设计,并提供了丰富的外设接口,包括 SPI, I2S, UART, I2C, PWM 等接口,且支持高性能、低功耗工作模式^[14-15]。

设计的主控芯片外围电路如图 2 所示。在该装置中,需要供电的部分包括 ESP32、传感器和舵机模块,其所需要的电压均在 1.9~5.0 V,故采用 14500 电池管理模块为装置供电。通电工作后,传感器模块测得的磁场数据通过 SPI 通信传输至 ESP32, RM3100 的 SPI 接口包含 SCLK、MOSI、MISO 和 SSN 4 个接口,分别与 ESP32 的 GPIO14、GPIO13、GPIO12 和 GPIO10 相连。为实现通信稳定,SPI 时钟 SCLK 的频率设定在 1 MHz,在 SCLK 为高电平时,MOSI 上传输的数据被视为有效,SCLK 为低电平时,数据则处于变化中。在远程通信模块设计中,使用的芯片包括一个功能完备的 Wi-Fi 子系统,集成了 Wi-Fi MAC、Wi-Fi 射频和蓝牙射频。芯片通过与 PC 端建立网络连接,实现数据远程传输,与手机建立蓝牙连接,接收控制指令。在接收到指令后舵机配合总线伺服转接板,将舵机的单线半双工异步串行通信接口转换为双线 TTL 接口,转接板的通信接口分别与 ESP32 的 GPIO43、GPIO44 连接,转接板的 IO 口与舵机 IO 接口连接,ESP32 通过转接板实现对舵机的控制。

2.2 磁传感器硬件设计

为了使装置实现纳特级磁场的测量,选用合适的传感器至关重要。本文进行了一系列实验,对比了常见的磁场传感器,如 RM3100、QMC5883、霍尔传感器和 CC01 等传感器,最终选用具有更高精度,更好线性度和稳定性的

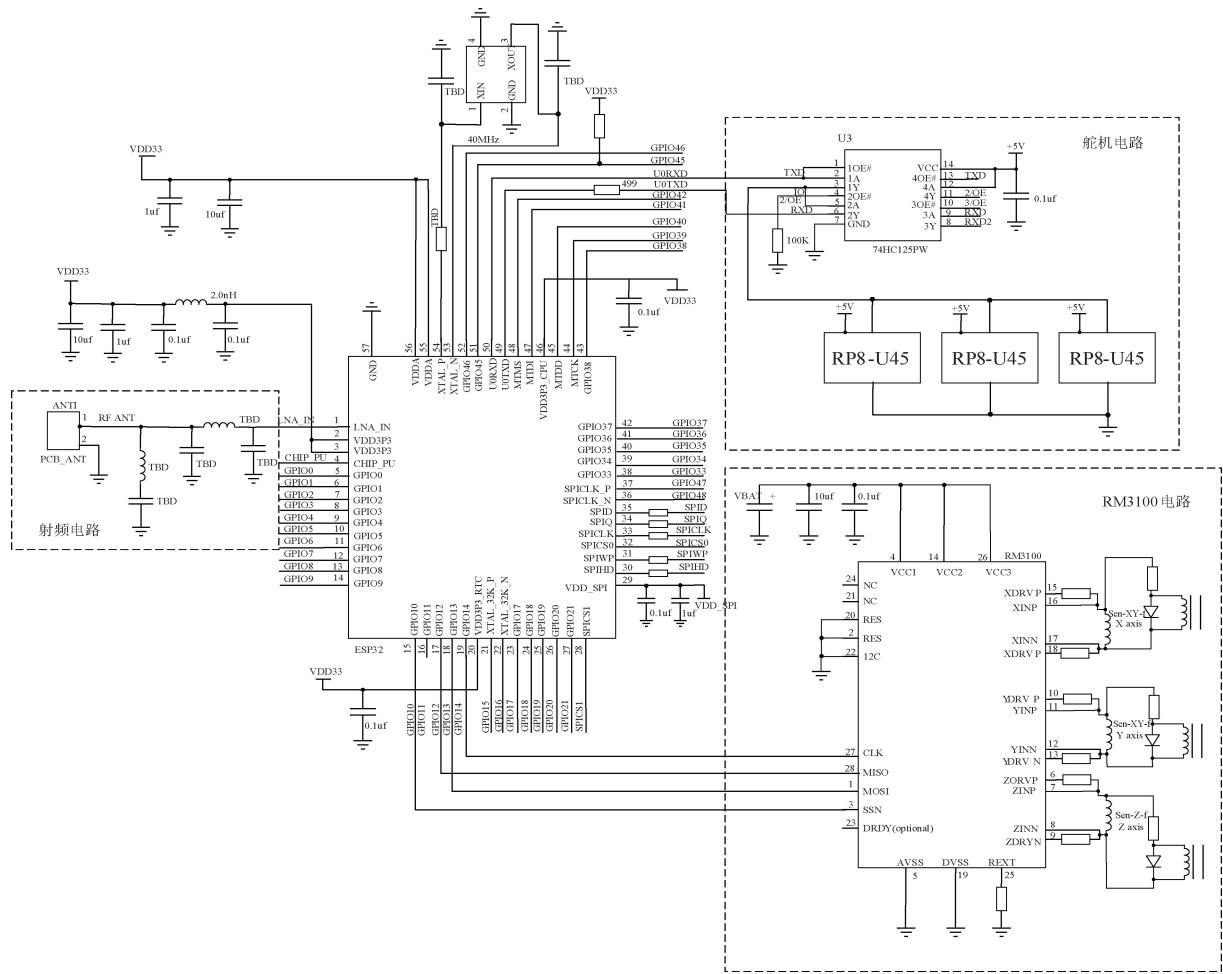


图 2 主控芯片外围电路图

Fig. 2 Peripheral circuit diagram of the main control chip

RM3100 作为核心传感器,其能够实现 3 个方向的磁场强度实时测量。该传感器基于 PNI 磁传感器技术,内部包含 LR 振荡电路,利用高磁导率磁芯和周围螺旋管结合构建的电感元件,从而实现了一个方向上的磁场测量,如图 3 所示电路还包含施密特触发器用于状态切换。

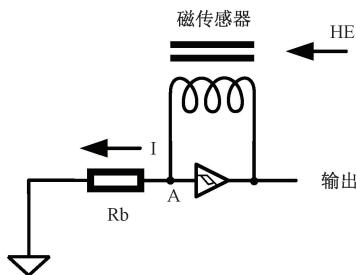


图 3 PNI 磁传感器工作电路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the working circuit
of PNI magnetic sensor

根据物理定律,当电路接通电源时,传感器处的磁场强度 H 由外界磁场强度 HE 和电流产生的部分磁场组成,大

小与电流成正比,用 KI (K 为常数)表示。因此,单一方向上的磁场大小计算公式如式(1)所示。

$$H = HE + KI \quad (1)$$

在磁场测量过程中,施密特触发器的阈值电压为 VH ,当输入电压(A 点电压)为 0 或小于阈值电压 VL 时,触发器逻辑状态为“1”,输出大小为 VS 的电压信号。传感器两端的电压会逐渐增加,直到 A 点电压上升到 VH 时,触发器逻辑状态转换为“0”,传感器上的电压开始减小。传感器在受到正向或负向电压驱动时,所产生的磁场强度能处于图 4 所示的虚线区域中,图 4 中 $\mu(H)$ 代表磁导率。当外界磁场为 0 时,无论是正向或负向驱动,都能得到相同波形图如图 4 左下方所示。当外界磁场为 HE 时,正向驱动和负向驱动的情况都会受到影响。由于 HE 的方向一定,从而导致磁场范围向同一方向发生移动,结果是一种情况下的磁导率增加,另一种情况下则减小,从而导致两种情况下的电感系数不再相同,振荡电路的电压波形周期 τ 也随之增大或减小,如图 4 右下方所示。当振荡电路输出结果为正向电压和负向电压时,PNI 磁传感器的 ASIC 芯片会对相

同数量的波形周期时间进行对比和计算,直接输出与外部磁场强度相关的数字信号,使其具有更高的测量精度。

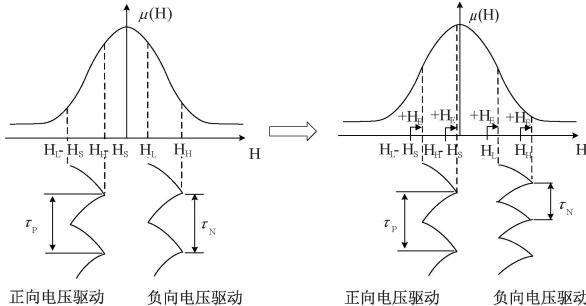


图 4 输出波形与磁场强度关系

Fig. 4 Relationship between output waveform and magnetic field strength

2.3 总线伺服智能舵机硬件设计

由于纳特级的磁场过于微小,并且在磁场测量实验中,还需要经常调节测量位置,传统的手动移动不仅浪费时间,还会增加装置测量结果的误差。为了解决这一缺点,本装置设计了一种可近距离控制的三轴移动平台。该移动平台不仅可以配合磁传感器 RM3100 实现三维磁场测量,还可以利用蓝牙无线通信实现近距离控制,既增加了装置的灵活性,又避免了手动移动而造成的测量误差与时间损失。

该三轴移动平台由两个二维显微移动卡尺和 3 个舵机组合而成,采用 RP8-U45 总线伺服智能舵机控制模式,没有采用传统的 PWM 舵机控制模式。传统的 PWM 舵机控制时需要利用单片机生成 PWM 信号来调节角度,这种方法存在精度不足和缺乏角度反馈的问题,无法满足微弱磁场装置对三维移动平台最小 1.0 mm 移动精度的要求。相比之下,RP8-U45 总线伺服智能舵机采用串口通信协议,通过以字节流形式传输角度数据,其行程范围为 360°,最小可实现 1°的精确转动,确保了角度传递的可靠性和准确性。总线伺服智能舵机在控制时首先要将主控板与手机建立蓝牙连接,然后通过手机端的蓝牙控制页面,如图 5 所示,向 ESP32 发送 X 轴左移、Y 轴右移,Z 轴上移等指令,控制测量装置传感器探头在 X、Y、Z 三个方向的位移。主控板在接受到指令之后,根据指令内容控制相对应的舵机的转动,舵机每转动 1°会控制卡尺移动 1.0 mm,实现对测量位置精细调节,整体工作过程的示意图如图 6 所示。

3 系统软件设计

系统软件设计思路是为了在工作中实现高效、实时的数据处理和传输,同时保证系统的稳定性和精准性,使微弱磁场测量装置能够实现纳特级磁场测量,更好地应用于实际场景中。在主控芯片 ESP32 中的软件设计中,采用了 C 语言进行程序编写,实现对包括数据采集模块,远程控制模块,数据传输模块等模块的实时精准控制,系统软件流程图如图 7 所示^[16]。为了提高测量效率,主控程序采用了多线程驱动,



图 5 蓝牙控制页面

Fig. 5 Bluetooth control page

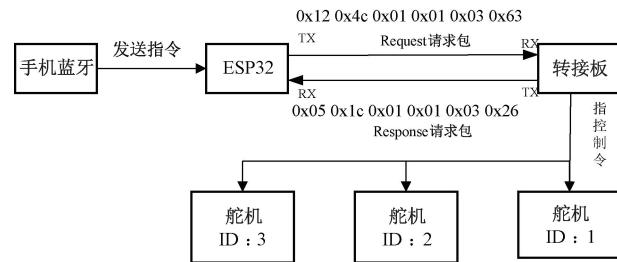


图 6 舵机控制模块工作流程图

Fig. 6 Schematic diagram of the servo control module's workflow

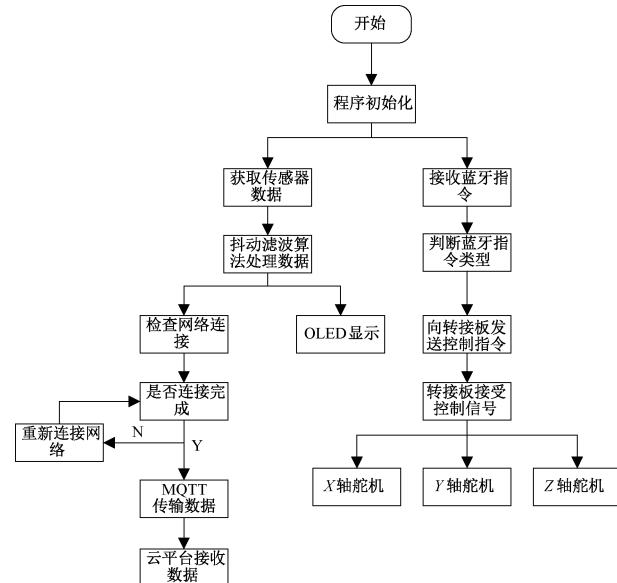


图 7 系统软件运行流程

Fig. 7 The operating process of system software

实现了数据采集、数据传输以及远程控制功能的并行执行,确保了装置在执行磁场测量任务时,能够实时处理与传输数据,并控制装置的三轴移动平台进行精准的位置调节。

3.1 数据处理与显示

磁传感器 RM3100 能够测量到纳特级别的磁场,而

WIFI 与蓝牙设备在数据传输时产生的电磁信号磁感应强度虽不大于 $0.04 \mu\text{T}$, 但依然会对测量结果产生一定的影响。设计中采用了中断函数实现了数据采集与数据传输两者之间的切换, 有效的避免了数据传输过程中 WIFI 与蓝牙信号对磁传感器的干扰。即使去除了无线信号的干扰, RM3100 测出的原始磁场强度数据也会在某一数值范围内频繁波动, 尤其是 10 nT 的末位数据, 波动更为明显。为实现对纳特级磁场的精确测量, 达到输出数据的稳定与跟随, 本装置在软件设计中的数据预处理模块里加入了加权平均滤波算法, 该算法对数据的处理平滑效果好, 算法简单高效。设计中, 在此算法基础上引入了时间参数, 可以避免算法产生时延而导致的测量误差。通过限制窗口可以进一步提高算法的灵敏度, 来达到寻优的目的, 改进后的算法模型如图 8 所示。

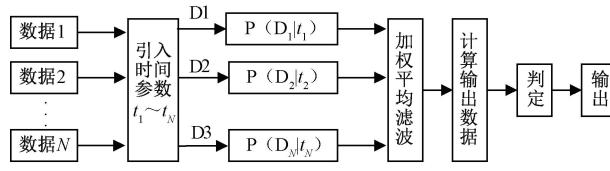


图 8 算法模型

Fig. 8 Algorithm model

图 8 中的 N 代表数据的采集窗口。首先, 窗口内采集到的原始数据会根据采样时间 $t_1 \sim t_N$ 从小到大进行排序, 然后由中间值开始向两边进行递减加权, 加权系数为 $D_1 \sim D_N$, 最后利用式(2)进行加权平均滤波计算输出。式(2)中 Y 为 N 个采样值的加权平均值, X_i 为第 i 次采样值, N 为采样次数, D_i 为加权系数。

$$Y = \sum_{i=0}^N X_i D_i \quad (2)$$

考虑到实验结果的偶然性, 在数据输出之前还需要结合格拉布斯准则进行判定。根据实验得到 N 个数据 X_1, X_2, \dots, X_N , 求得这 N 个数据的算术平均值 X 与平均剩余误差 V , 依照贝塞尔公式, 如式(3)所示。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} = \sqrt{\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_N - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (3)$$

标准差 $\sigma(X) = S$, $g(N, a)$ 取决于测量次数 N 和出错概率系数 a , 可通过查表确定具体数值。若 $N = 20, a = 0.05$, 此时 $g(N, a) = 2.557$ 。当计算结果 Y 与平均剩余误差满足式(4)。

$$|V| = |Y - X| \geq g(N, a) \times \sigma(X) \quad (4)$$

表示该输出数据需要被剔除, 反之作为最终数据输出, 进入下一步处理。实验结果的前后对比如图 9 所示, 可以看出在数据处理模块中加入滤波算法之后, 装置测量的抗干扰能力增强, 输出数据更加平滑, 能够稳定读取 10 纳特级的数据末位, 实现纳特级磁场数据的稳定输出。

处理过的三轴磁场数据会进一步用式(5)计算出总的

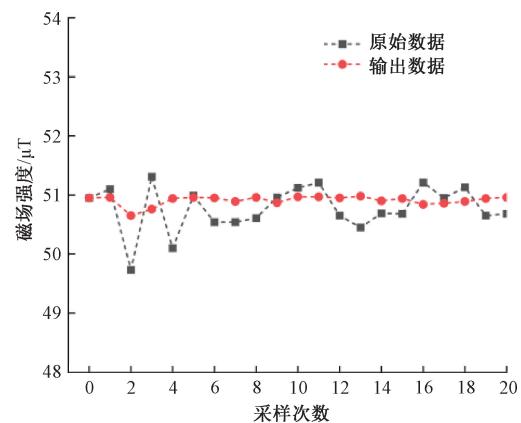


图 9 原始数据与输出数据对比

Fig. 9 Compare the original data with the output data

磁场强度 H , 并将其作为变量储存在主控板中。在工作过程中, 主控板设置成 Station 模式, 与云平台建立 WIFI 网络连接, 将处理后的三轴磁场数据与总磁场强度 H 借助 MQTT 协议实时上传至云平台^[17], 同时在装置本身的 OLED 显示屏显示这些数据, 方便用户直接查看。

$$H = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}}{3} \quad (5)$$

3.2 云服务端的设计

基于腾讯云和 Tomcat 服务器二次开发的本装置云服务端包括设备选择页面、三轴数据监控页面、总磁场强度变化曲线页面。云服务端的设计预留了大规模数据处理接口、网络接口, 可以支持更多的磁场测量装置同时接入使用^[17]。多装置同时连接云服务端时, 服务端会根据设备名称自动编号。用户也可以根据硬件设备名称在设备选择页面中对接入的装置进行重新编号排序便于管理。在云服务端设备选择页面中双击装置编号, 在三轴数据监控页面即可查看当前编号装置的磁场测量数据。在总磁场强度变化曲线页面, 可以查看历史数据或根据数据变化趋势预测接下来的数据变化, 如图 10 所示, 其中 X 轴表示时间, Y 轴表示总磁场强度。



图 10 总磁场强度变化页面

Fig. 10 Changes in total magnetic field intensity page

4 装置精度测试及应用

市场上常见的弱磁场测量装置性能与成本如表 1 所示。这些测量仪成本通常在 1 000 元以上,且测量方向单一,大多需要手持测量探头并通过显示屏读取测量数值。从表 1 中可以看出,本装置在成本较低的前提下,实现了 3 个方向的磁场强度测量,具有最高的分辨率,且可以通过蓝牙对三维移动平台进行近距离控制,提高装置灵活性的同时避免了手动操作造成的测量误差,为磁场测量提供了新的选择。

表 1 装置对比

Table 1 Device comparison

装置	成本/元	测量方向	测量精度/ μT	数据显示
本文装置	500	3	0.01	屏幕/远程
TD8650	3 800	1	1	屏幕
手持高斯计	1 120	1	10	屏幕
HT201	2 700	1	10	屏幕
文献[9]	2 000	1	100	屏幕
文献[11]	1 000	1	100	屏幕
文献[12]	3 800	2	10	屏幕

为验证本文设计的微弱磁场测量装置的数据准确性和有效性,利用该装置分别进行了地磁场强度测量和通电螺线管轴线磁场强度测量,测量结果与理论一致,装置实物图如图 11 所示。

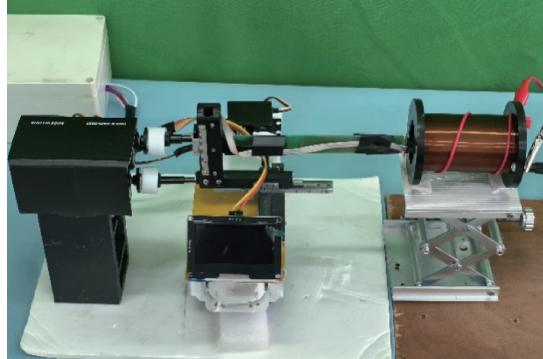


图 11 装置实物图

Fig. 11 Device physical diagram

4.1 地磁场强度测量

根据相关文献,自然界中的地磁场强度大小约为 25~65 μT ^[18],而本装置能够检测纳特级别的磁场,测量数据会受到地磁场影响,为了确保后续实验的准确性,需要提前测量实验地点的地磁场大小。地点选在室外空旷地带进行,可以排除周围电子产品产生的磁场干扰。在实验开始前,首先利用装置的 Y 轴来标定地磁场的方向,Y 轴与地面平行,Z 轴与地面垂直。然后逆时针或顺时针转动装置的 Y 轴,当 Y 轴逐渐指向正北方向时,地磁场磁感线通过 Y-Z 面

的数量几乎为零时,Y 轴的输出数据也接近于 0,此时可以确定 Y 轴所指的方向为正北。最后,装置测量得到的总磁场强度就是当前位置的地磁场强度,大小为 28.93 μT 与亥姆赫兹测量数值一致,最小测量精度达到了 10 nT。这个实验验证了测量装置的准确性,能够进行地磁场这种微弱磁场的测量,且操作简便。

4.2 通电螺线管轴线磁场强度测量

在进行通电螺线管轴线磁场强度测量之前,利用物理仿真软件中磁场模块分别构建了螺线管的二维和三维磁场分布几何模型^[19]。螺线管的具体参数设定为长度 80 mm,半径 38 mm,每一匝线圈中通过的电流设定为 30 mA,确保仿真模型与实际实验中螺线管的高度一致。对仿真结果进行分析,可以得到通电螺线管的轴线及外部空间的磁场分布呈现高度对称性,其中三维的仿真结果如图 12 所示。

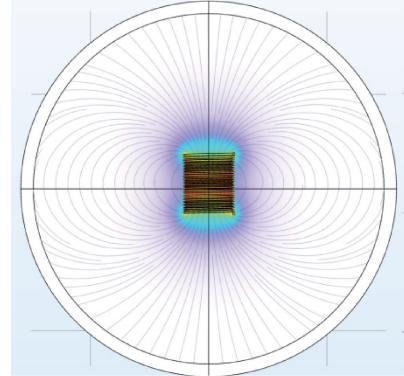


图 12 螺线管磁场分布仿真图

Fig. 12 Helical coil magnetic field distribution simulation diagram

利用直流稳压电源对螺线管通入 30 mA 电流,并根据右手螺旋定则判断螺线管的 N 极与 S 极。当螺线管的 N 极与地磁的 N 极同向时,称之为顺磁状态,此时测量得到的数据需要减去地磁场测量实验中得到的地磁场数据才是真实的数据。利用霍尔效应测量仪对轴线上均匀分布的 11 个点位进行测量,标定磁场强度大小,磁场强度的计算公式如式(6)所示。

$$B = \frac{U_H}{IK_H} \quad (6)$$

式中: U_H 为霍尔测量仪测量得到的霍尔电压,单位为 mV,电流 I 为 30 mA,测量仪的霍尔灵敏度 K_H 为 15.31 $\text{mV}\cdot\text{mA}^{-1}\cdot\text{T}^{-1}$ 。 B 为轴线上待测的磁场强度,单位为 T。标定完轴线上的磁场强度之后,利用本文设计的磁场测量装置,在相同点位进行磁场强度测量,标定数据与测量数据如表 2 所示。

对表 2 的数据进行分析计算,得到该装置的测量相对误差在 5% 以内,可以实现微弱磁场的精确测量,并且由图 13 可以看出,测量得到的磁场分布规律与物理仿真得到的规律一致,进一步证明了该装置在微弱磁场测量方面的精准性、可靠性、有效性。

表2 测量值与标定值

Table 2 Measured value versus calibrated value

实验序号	距离/mm	$H_{\text{测}}/\mu\text{T}$	$H_{\text{标}}/\mu\text{T}$	相对误差/%
1	0	133.31	127.89	4.23
2	8	201.52	193.78	3.99
3	16	263.71	252.84	4.29
4	24	316.29	303.35	4.26
5	32	338.34	324.83	3.96
6	40	337.23	325.45	3.61
7	48	332.73	324.77	2.45
8	56	315.51	302.38	4.34
9	64	264.28	251.89	4.91
10	72	198.96	191.41	3.94
11	80	131.75	126.17	4.42

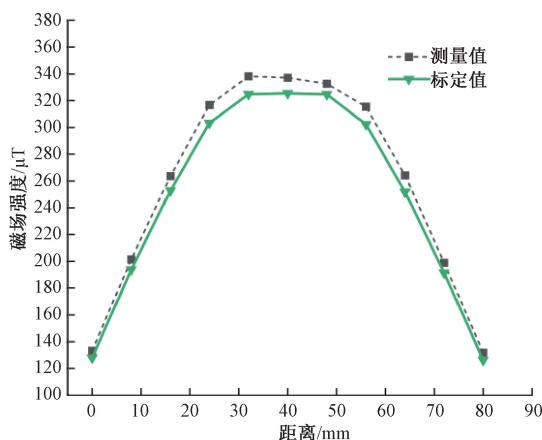


图13 螺线管轴线磁场分布曲线图

Fig.13 Helical coil axial magnetic field distribution curve graph

5 结 论

本文针对现有的微弱磁场装置存在成本高、精度低、灵活性受限等问题,设计并制作了一款三维磁场测量装置,实现了纳特级别磁场强度的稳定测量,能够同时测量X轴、Y轴、Z轴3个方向上的磁场强度数据,测量范围为 $\pm 800 \mu\text{T}$ 。通过融合先进的通信技术和云服务技术,实现了数据的远程传输与装置的近距离控制。装置的测量精度与准确性经过了严格的实验验证,实验结果表明装置能够稳定输出最高精度为10 nT的数据,在实际应用中测量误差在5%以内。该装置对降低仪器成本、提升磁场测量的精确度和效率具有一定的参考价值,在微弱磁场测量领域具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 高东,朱明慧,韩鹏.一种地磁/惯性深度融合导航方法[J].中国惯性技术学报,2022,30(4):437-444.
- GAO D,ZHU M H,HAN P. A geomagnetic/inertial depth fusion navigation method[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2022,30(4):437-444.
- [2] 王可昕,王振占.地球磁场微波遥感探测方法研究进展[J].空间科学学报,2024,44(5):818-831.
- WANG K X,WANG ZH ZH. Advances in the study of the methods for detecting the earth magnetic field from passive microwave remote sensing[J]. Chinese Journal of Space Science, 2024,44(5):818-831.
- [3] 杨晓惠,陈龙,蒲海峰,等.基于瑞利磁滞回线的X80管线钢力磁特性研究[J].传感技术学报,2023,36(11):1768-1774.
- YANG X H, CHEN L, PU H F, et al. Research on magneto-mechanical properties of X80 pipeline steel based on rayleigh hysteresis loop[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023,36(11):1768-1774.
- [4] 谭超,闵薪宇,辛亮,等.一种基于单轴向充磁永磁环励磁的钢丝绳无损检测方法[J].传感技术学报,2024,37(4):731-736.
- TAN CH,MIN X Y,XIN L, et al. A nondestructive testing method for steel wire rope based on axial magnetization of single permanent magnet ring[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2024, 37(4):731-736.
- [5] 张明珠.基于磁平衡的钢丝绳探伤数字传感器研究[J].煤炭工程,2024,56(9):179-185.
- ZHANG M ZH. Research on digital sensor for wire rope flaw detection based on magnetic balance[J]. Coal Engineering, 2024,56(9):179-185.
- [6] LEI R, GAO Y, FENG D, et al. Magnetic field measurement with temperature compensation based on a fiber ring microwave photonic filter and Vernier effect[J]. Optics Letters,2024, 49(20): 5739-5742.
- [7] 刘晓瑜,南金龙,王子熠,等.基于霍尔元件的螺线环磁场测量装置及实验设计[J].实验技术与管理,2023,40(9):179-186.
- LIU X Y, NAN J L, WANG Z Y, et al. Toroidal solenoid magnetic field measurement device and experimental design based on Hall element [J]. Experimental Technology and Management, 2023, 40(9):179-186.
- [8] HARIHARAN N, MOTY S, SHAI A, et al. High sensitivity planar hall effect magnetic field gradiometer for measurements in millimeter scale environments [J]. Micromachines, 2022, 13(11): 1898.
- [9] 关鑫航,刘舒锦,王欣怡,等.一种基于磁流体包覆锥形光纤的磁场传感器[J].黑龙江大学自然科学学报,2024,41(5):606-612.
- GUAN X H,LIU SH J,WANG X Y,et al. A magnetic

- field sensor based on magneto-fluid-coated tapered fiber[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2024, 41(5): 606-612.
- [10] 赵欣瑜, 江兴方, 阮志强, 等. 一种检测弱磁场的光纤传感器的研究与仿真[J]. 应用光学, 2024, 45(4): 873-878.
ZHAO X Y, JIANG X F, RUAN ZH Q, et al. Research and simulation of fiber sensor for weak magnetic field detection[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(4): 873-878.
- [11] 白鹏鹏. 基于光纤环衰荡方法的锥形光纤磁场传感系统研究[D]. 山西: 太原理工大学, 2023.
BAI P P. Research on tapered fiber magnetic field sensing system based on fiber loop ring-down method [D]. Shanxi: Taiyuan University of Technology, 2023.
- [12] 万世荣, 高文磊, 丁嘉文, 等. 一种亥姆霍兹线圈轴平面三维磁场测量装置[J]. 大学物理, 2023, 42(8): 49-54.
WAN SH R, GAO W L, DING J W, et al. A three-dimensional magnetic field measuring device for axial plane of Helmholtz coil[J]. College Physics, 2023, 42(8): 49-54.
- [13] 顾锐锋, 谢念, 冯文天, 等. 一种基于多传感器融合的磁场测量系统设计[J]. 原子核物理评论, 2024, 41(2): 635-640.
GU R F, XIE N, FENG W T, et al. A design of magnetic field measurement system based on multi-sensor fusion[J]. Nuclear Physics Review, 2024, 41(2): 635-640.
- [14] 孙巍伟, 梁毅伟, 毛亦鹏, 等. 基于多传感信息融合的跌倒监测系统开发[J]. 电子测量技术, 2024, 47(22): 94-103.
SUN W W, LIANG Y W, MAO Y P, et al. Development of a fall detection system based on multi-sensor information fusion[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(22): 94-103.
- [15] 毛博文, 李永可, 王磊, 等. 基于ESP32的大田水肥一体化控制系统设计[J]. 现代电子技术, 2024, 47(14): 103-107.
MAO B W, LI Y K, WANG L, et al. Design of integrated field water and fertilizer control system based on ESP32[J]. Modern Electronics Technique, 2024, 47(14): 103-107.
- [16] 何龙, 靳斌. 基于STM32的铜线放线监测系统设计[J]. 电子测量技术, 2024, 47(19): 17-23.
HE L, JIN B. Design of copper wire laying monitoring system based on STM32[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(19): 17-23.
- [17] 李明砾, 吴涛, 任建鑫, 等. 基于可穿戴设备医用防护服微环境监测系统的研究[J]. 现代电子技术, 2024, 47(6): 79-84.
LI M SH, WU T, REN J X, et al. Research on wearable devices based microenvironment monitoring system for medical protective clothing [J]. Modern Electronics Technique, 2024, 47(6): 79-84.
- [18] 张霆, 刘彩霞, 李建设, 等. 地磁场测量及应用居家实验[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(2): 176-180.
ZHANG T, LIU C X, LI J SH, et al. Home experiment for geomagnetic field distribution measurement and its application [J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(2): 176-180.
- [19] 李泽松, 黄腓力, 王一民, 等. 基于等效电流密度模型的多层有限长螺线管轴线磁场分析[J]. 计量学报, 2024, 45(9): 1378-1383.
LI Z S, HUANG F L, WANG Y M, et al. Analysis on the axial magnetic field of multi-layer finite solenoid based on the equivalent current density model[J]. Acta Metrologica Sinica, 2024, 45(9): 1378-1383.

作者简介

吴庆州(通信作者), 硕士, 副教授, 主要研究方向为仪器测试计量技术。

E-mail: 35267443@qq.com