利用巨磁阻传感器测量地磁场

贺淳凯，李志兵
（湖南科技学院，湖南永州 425199）

摘　要：基于巨磁阻传感器的高灵敏度特性，搭建地磁场测量装置，并利用亥姆霍兹线圈产生均匀可控的补偿磁场对传感器进行校准与标定；随后精确调整传感器的水平方位与俯仰角，分别测量水平及竖直方向的地磁场分量，结合矢量合成方法求得地磁场总强度及磁倾角。实验结果表明，该方案的测量值与当地地磁参考值基本吻合，相对误差在4%以内，验证了基于巨磁阻传感器的地磁场精密测量方案的可行性。此外，该装置利用常规实验室已有的亥姆霍兹线圈与恒流源作为辅助设备，无须额外购置专用磁力测量仪器，显著降低了实验成本，为仪器设备资源有限的高校提供了一套可推广的地磁场精密测量实验教学模式，对拓展基础物理实验教学资源具有积极的实践价值。

关键词：巨磁阻传感器；地磁场；亥姆霍兹线圈
DOI：10.19935/j.cnki.1004-2326.2026.10.025
引用格式：贺淳凯，李志兵.利用巨磁阻传感器测量地磁场[J].实验教学与仪器，2026，43(10)：98-101.

测量地球磁场具有重要的科学意义与应用价值。一方面，它能帮助科学家探究地球内部结构及其演化历史，为地质研究提供关键线索，并可通过磁场异常变化识别不同地质体，助力地质勘探与矿产资源寻找；另一方面，地磁场作为天然导航工具，既影响生物定向行为，也在卫星信号失效时为人类导航提供备用方案，还能监测空间环境扰动，保障卫星、通信及电力系统的安全运行；此外，地震前的地磁场异常变化虽尚在探索阶段，但为灾害预警提供了潜在的研究方向[1]。

高精度地磁场测量通常依赖质子旋进磁力仪、光泵磁力仪等专业设备，虽精度高但成本较高，限制了高校普及。近年来，巨磁阻传感器因高灵敏度、低温漂特性成为新兴解决方案。本实验使用FB523型巨磁阻效应实验仪，结合亥姆霍兹线圈产生补偿磁场，基于“补偿-检测”原理，通过巨磁阻传感器输出电压与励磁电流的线性标定，推算地磁场分量，最终通过矢量合成法得出总地磁感应强度[2]，成功验证了采用巨磁阻传感器测量实验室所在地地磁场技术方案的可行性。

此外，实验核心装置（亥姆霍兹线圈、基础恒流源、电压表等）是许多高校物理实验室的常规配置，本实验方案巧妙复用了这些现有的基础设备，结合相对经济的巨磁阻传感器模块，可以构建完整的测量地磁场系统。相对于那些动辄数十万元的专业地磁测量设备（如质子旋进磁力仪、光泵磁力仪等），该方案成本低廉，有效弥补了高校经费限制导致的高端测量仪器匮乏的问题，使地磁场精密测量实验可以在更加广泛的院校实验室中开展。

本实验对理解磁场测量原理及传感器技术发展有教学与科研价值。本方案操作逻辑清晰，不仅验证了物理原理（电磁学、传感器技术、矢量合成），更开发了基础实验设备的新应用场景，设备搭建相对简便，非常适合纳入本科物理实验教学体系，为丰富和拓展物理实验课程内容（尤其是近代物理实验、传感器应用实验）提供了案例，使学生能在有限资源条件下，接触到前沿传感器技术和实际物理问题的测量方法，提升实践能力和科研素养。

1　实验原理

将巨磁阻效应元件接入惠斯通电桥电路，巨磁阻传感器将磁场转化为可测量的电压信号。通过记录不同磁场强度（由亥姆霍兹线圈调控）对应的输出电压值，可建立电压-磁场关系，利用毕奥-萨伐尔定律得到电压-励磁电流关系，从而对传感器进行定标。继而通过测量该传感器在地磁场中输出电压的定量测量值，反推地磁场的大小和方向。

1.1　实验装置

本实验的核心装置系统以杭州精科仪器有限公司生产的FB523型巨磁阻效应实验仪为核心，搭配亥姆霍兹线圈、基础恒流源及数字电压表，构建起“磁场产生—信号检测—数据采集”的完整测量链，实验装置如图1所示。

1.2　巨磁阻传感器

巨磁阻（Giant Magnetoresistance，GMR）效应是指由铁磁金属与非磁金属交替堆叠形成的多层薄膜材料在外磁



图1 巨磁阻效应实验装置

场作用下电阻发生显著变化的量子力学现象，其电阻变化幅度从百分之几十到10^6量级。该效应源于电子自旋方向与铁磁层磁化方向的相互作用：当相邻铁磁层磁矩平行时电阻最小，反平行时电阻最大。

巨磁阻传感器由4个GMR元件构成惠斯通电桥，其输出电压公式为：$U_{输出}=U_{out+}-U_{out-}=V_+\times\frac{R_1}{R_1+R_2}-V_+\times\frac{R_2}{R_1+R_2}=\frac{V_+}{R_1+R_2}(R_1-R_2)$，无外加磁场时$R_1$=$R_2$，输出电压为0；外磁场作用下GMR元件阻值随磁场变化（平行磁场时部分阻值增大、反向时减小），使电桥失衡产生输出电压，且输出电压与磁场强度呈线性关系。可以通过测量已知磁场的输出电压，确定该传感器的输出电压-磁场关系，此过程即为定标。利用该关系，通过传感器在未知磁场中输出电压的测量值反推磁场大小。

1.3 亥姆霍兹线圈的磁场

在定标过程中，需要对已知磁场的输出电压进行测量。其中，已知磁场可以由励磁电流激发，根据毕奥-萨伐尔定律计算磁场的大小[3]，单匝圆形线圈轴线上距离线圈平面x处的磁感应强度为：

$$B_0=\frac{\mu_0R^2}{2\left(R^2+x^2\right)^{\frac{3}{2}}}NI。\qquad①$$

本实验中亥姆霍兹线圈由两个匝数、间距、线圈半径皆相同的线圈组成，两线圈中心轴线上中点处的磁场为：

$$B_0=2\times\frac{\mu_0R^2}{2\left(R^2+x^2\right)^{\frac{3}{2}}}NI=\frac{\mu_0R^2}{\left(R^2+x^2\right)^{\frac{3}{2}}}NI。\qquad②$$

通过上式可以建立励磁电流I_M与亥姆霍兹线圈产生的磁感应强度B之间的定量对应关系，即磁场-电流关系。结合已建立的输出电压-磁场关系，可以建立起传感器的输出电压-励磁电流关系。

1.4 地磁场的测量

通过测量GMR传感器在地磁场水平方向上、竖直方向上的输出电压值，结合输出电压-磁场关系，即可分别求出地磁场的水平分量$B_{水平}$和竖直分量$B_{竖直}$。根据矢量合成法则，总磁感应强度$B_{总}$为：$B_{总}=\sqrt{B_{竖直}^2+B_{水平}^2}$。③

磁倾角θ定义为地磁场总矢量与水平面的夹角，其计算公式为：$\theta=\arctan(\frac{B_{竖直}}{B_{水平}})$。④

2 实验测量

2.1 定标

为获得输出电压与励磁电流的关系，改变亥姆霍兹线圈的励磁电流I_M，记录对应的输出电压U。输出电压U与亥姆霍兹线圈的励磁电流I_M的关系如图2所示。

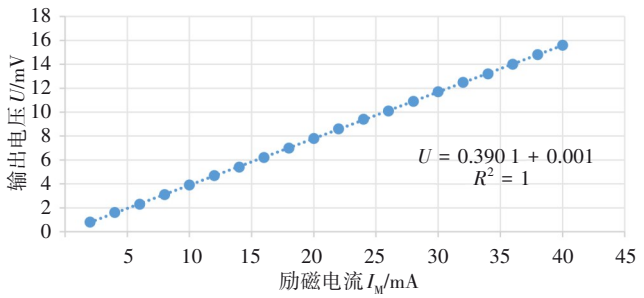


图2 巨磁阻传感器定标曲线

2.2 地磁场数据的测量

为测量水平磁场分量$B_{水平}$，将实验仪器水平放置，断开亥姆霍兹线圈的电流。为消除亥姆霍兹线圈剩磁对地磁场的影响，将线圈轴线沿东西方向放置，分别测量传感器在正反两个方向上电压的差值。旋转传感器敏感轴方向，每旋转1°记录一次传感器的输出电压值。采用敏感轴正向输出电压值和敏感轴反向输出电压值相减的方法寻找地磁场的水平方位，将差值最大的方位计为0°，此方位即为地磁场水平分量的方向。第1次测量的传感器电压差值随方位角的变化如图3所示。根据该测量结果，确定传感器电压差值$\Delta U_{水平}$最大值为0.002 3 V。为测量地磁场的竖直分量，将实验仪器沿竖直方向放置，分别测量传感器敏感轴竖直向上和向下时的输出信号电压值。经过多次测量取平均值，得到：$\Delta U_{竖直}=U_{下}-U_{上}$=0.012 8 V − 0.010 6 V = 0.002 2 V。

3 数据处理

3.1 计算地磁场值

（1）定标。

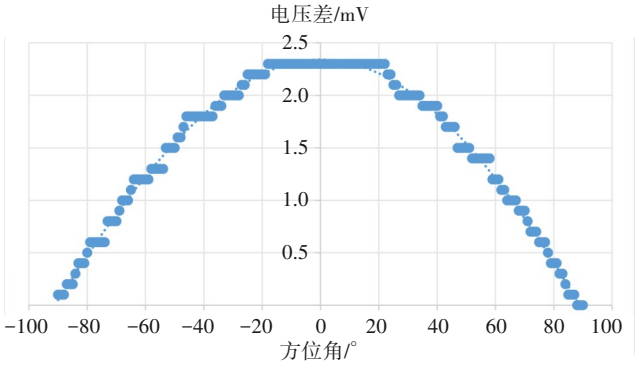


图 3　传感器的电压值随敏感轴方位角的变化关系

根据定标数据，得最小二乘线性系数 $k=\frac{\sum(I_i\times U_i)}{\sum(I_i^2)}=0.39$，因此输出电压 U 与亥姆霍兹线圈励磁电流 I_M 的定量关系为：$U=0.39I_M$。　⑤

为评估输出电压 U 与亥姆霍兹线圈的励磁电流 I_M 线性关系合理性和可靠性，基于定标数据计算残差（残差=测量电压值−拟合电压值），绘制残差分布图（图 4）。图 4 显示残差呈无规律分布，说明传感器在实验电流范围内无明显非线性响应，其线性特性稳定，间接保障了地磁场分量计算的准确性，为定标模型的有效性提供量化支撑。

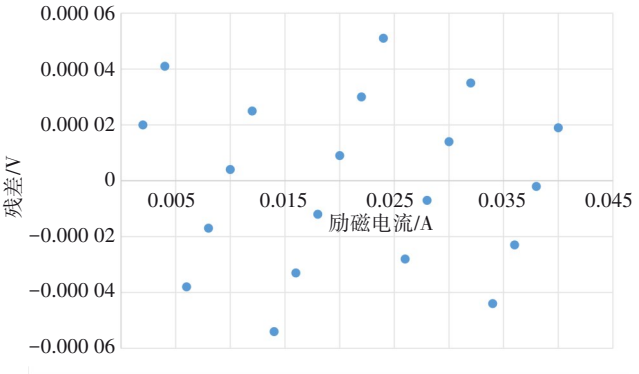


图 4　输出电压−励磁电流定标实验的残差分布

（2）地磁场计算。

根据线圈磁场公式②，代入数据：$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ T·m/A，$R=0.1$ m，$N=500$，$x=0.05$ m，得：$B=\frac{4\pi\times10^{-7}\times0.1^2}{\left(0.1^2+0.05^2\right)^{\frac{3}{2}}}\times 500\times I_M\approx4.49\times10^{-3}I_M$(T)；　⑥

联立式⑤和式⑥得输出电压与励磁电流的定量关系为：

$$U=\frac{0.39I_M}{4.49\times10^{-3}I_M}B=86.86B。\quad ⑦$$

水平方向的磁感应强度为：$B_{水平}=\frac{\Delta U_{水平}}{86.86}=2.65\times10^{-5}$ T，竖直方向的磁感应强度为：$B_{竖直}=\frac{\Delta U_{竖直}}{86.86}=2.53\times10^{-5}$ T。代入公式③计算总磁感应强度 $B_{总}$ 为：

$$B_{总}=\sqrt{B_{竖直}^2+B_{水平}^2}=\sqrt{(2.53\times10^{-5})^2+(2.65\times10^{-5})^2}\approx3.66\times10^{-5}\ \text{T}。$$

（3）磁倾角计算。

磁倾角是描述地磁场方向的关键物理量，定义为地磁场总矢量与水平平面的夹角，其大小直接反映地磁场在空间中的分布特征。基于地磁场计算中测量的地磁场水平分量与竖直分量，利用直角三角形几何关系计算磁倾角 θ，得：

$$\theta=\arctan\left(\frac{B_{竖直}}{B_{水平}}\right)=\arctan\left(\frac{2.53\times10^{-5}}{2.65\times10^{-5}}\right)=43.7^\circ。$$

（4）多次独立测量及统计验算。

为提升实验结果的可靠性与重复性，基于相同实验装置、操作流程及环境条件，开展 5 次独立地磁场测量实验。每次测量均按照地磁场测量规范，旋转传感器敏感轴并记录电压数据，确保测量过程的一致性与独立性。5 次测量的地磁场数据如表 1 所示。

表 1　5 次独立测量的统计分析结果

序次	总磁场强度/(10^{-5} T)
1	3.82
2	3.66
3	3.66
4	3.66
5	3.66

对数据进行统计分析，计算得出测量的标准差为 $7.155\,42\times10^{-7}$ T。各组测量的数值接近且标准差处于较低水平，反映测量系统的随机误差稳定可控；95%置信区间的半宽度为 $6.271\,88\times10^{-7}$ T，区间狭窄且集中，说明在 95%的置信水平下，真实均值的估计精度较高。

上述统计特征充分验证了测量方案的稳定性与可靠性，为地磁场分量及总磁感应强度的计算提供了坚实的数据支撑。

3.2　误差分析

（1）误差来源分析。

由于巨磁阻传感器的输出电压与磁感应强度并非严格线性关系，若直接按线性模型推算磁场值，可能引入系统偏差。此外，转盘最小刻度为 1°，实际水平方向可能并

不正好对应转盘的0°刻度(整数度方向),导致磁场敏感轴未严格沿竖直方向,从而引入测量误差。数字电压表的分辨率(0.000 1 V)及仪器精度限制了微小电压信号的捕捉能力。线圈加工精度、匝间距不一致等因素会导致磁场均匀性偏离理想模型,也必然影响定标的准确性。最后,传感器灵敏度系数可能随温度变化而波动,若未实时进行温度补偿,则会引入附加误差。

(2)测量误差计算。

误差采用误差传递公式计算:

$$\Delta B_{总}=\sqrt{\left(\frac{\partial B_{总}}{\partial B_{水平}}\Delta B_{水平}\right)^2+\left(\frac{\partial B_{总}}{\partial B_{竖直}}\Delta B_{竖直}\right)^2}=\sqrt{\left(\frac{B_{水平}}{B_{总}}\Delta B_{水平}\right)^2+\left(\frac{B_{竖直}}{B_{总}}\Delta B_{竖直}\right)^2};\quad ⑧$$

其中$\Delta B_{水平}$和$\Delta B_{竖直}$分别为水平和竖直方向的测量误差,主要取决于电压测量误差ΔU=±0.000 1V,则有:

$$\Delta B_{水平}=\Delta B_{竖直}=\frac{0.000\,1}{86.86}\approx 1.15\times10^{-6}\,\mathrm{T}。$$

将数据代入式⑧得:$\Delta B_{总}=\sqrt{\left(\frac{2.65\times10^{-5}}{3.66\times10^{-5}}\times1.15\times10^{-6}\right)^2+\left(\frac{2.53\times10^{-5}}{3.66\times10^{-5}}\times1.15\times10^{-6}\right)^2}\approx 1.15\times10^{-6}\,\mathrm{T}$。

相对误差为:

$$\delta=\frac{\Delta B_{总}}{B_{总}}\times100\%=\frac{1.15\times10^{-6}}{3.66\times10^{-5}}\times100\%\approx3.14\%。$$

可知实验测量的相对误差小于4%,测量精度较高。

4 结语

本研究基于巨磁阻传感器的高灵敏度特性,开展了地磁场测量的实验研究。通过搭建实验装置,利用亥姆霍兹线圈产生均匀可控的补偿磁场[4],对巨磁阻传感器进行了校准与标定,有效消除了传感器的非线性误差和零点漂移。实验中,通过精确调整传感器的方位和倾角,测量了地磁场在不同方向上的分量,并采用矢量合成方法计算了地磁场的大小和方向。实验结果显示,地磁场的水平分量为2.65×10^{-5} T,地磁场的竖直分量为2.53×10^{-5} T,通过矢量合成得到的总磁感应强度为3.66×10^{-5} T。误差分析表明,电压测量误差对总磁感应强度的影响较小,相对误差约为3.14%,说明采用巨磁阻传感器能够快速、准确地捕捉地磁场的微弱变化。

为了验证该实验结果的准确性,笔者查阅了地磁场相关的文献并进行对比。杨琳青等[5]给出了磁场随经纬度的分布情况,实验地点位于湖南省永州市零陵区湖南科技学院,纬度是北纬26°12′34″,经度是东经111°36′15″(数据来源于Bigemap地球在线的湖南科技学院卫星地图),对比文献中分布图得出,地磁感应强度介于3.3×10^{-5} T和3.5×10^{-5} T之间,与本实验测量结果并非完全吻合,但二者数值偏差处于合理区间。

此外,笔者利用IGRF-14模型获取精确分量值,得到水平方向地磁场分量约为3.6×10^{-5} T,竖直方向分量约为3.2×10^{-5} T,实验结果明显偏小。同时,实验测得的磁倾角为43.7°,表明在实验地点地磁场总感应强度矢量与水平面的夹角为43.7°,且向下方倾斜。该数值与IGRF-14模型中计算的41.262°偏差仅为2.438°,从磁倾角数据的对比来看,用本实验的装置和方法测量地磁场是可行的,也是相对有效的。

综上所述,本研究不仅验证了巨磁阻传感器在地磁场测量中的实用性,也为后续相关技术的发展和实际应用奠定了基础。此外,本实验通过复用基础实验设备,解决了高校因高端仪器匮乏无法开展地磁实验的痛点。因此,本方案可作为普适性教学资源推广,其模块化设计适配现有物理实验体系,操作流程可强化学生对磁场测量原理的理解。

基金项目:"十四五"湖南省省级特色应用学科"计算机科学与应用"专项,编号:60302。

作者简介:贺淳凯(2004—),男,研究方向:中学物理和实验教学,E-mail:2061823144@qq.com。

通信作者:李志兵(1983—),男,副教授,研究方向:高能天体物理,E-mail:lizhibinglizhibing@163.com。

参考文献

[1] 王晓飞,韩焱,李凯.基于改进巨磁电阻芯片的三维地磁传感器设计[J].磁性材料及器件,2014,45(04):28-30,49.

[2] 林君,刁庶,张洋,等.地球物理矢量场磁测技术的研究进展[J].科学通报,2017,62(23):2606-2618.

[3] 曹雪能,曾川,周鲜鲜.圆线圈和亥姆霍兹线圈磁场分布的教学研究[J].产业与科技论坛,2023,22(10):159-160.

[4] 王婧怡,钱政,王现伟.巨磁阻传感器动态特性测量方法的研究[J].电测与仪表,2016,53(01):38-42.

[5] 杨琳青,赵旭东,阿里木江·麦麦提依明,等.EMM2017地磁场模型在中国地区的精度评估及初步改进[J].地球物理学报,2025,68(06):2245-2261.