

利用亥姆霍兹线圈测量地磁场强度及磁倾角^{*}

刘竹琴

(延安大学物理与电子信息学院 延安 716000)

摘要: 根据亥姆霍兹线圈轴线上磁场分布的特点,能在其轴线中点附近产生较广的均匀磁场区,根据磁场的叠加原理,推导了地磁场的水平分量、垂直分量及地磁场强度、磁倾角的实验计算公式。采用了FD-HM-I型亥姆霍兹线圈,利用高灵敏度毫特斯拉计,探测亥姆霍兹线圈公共轴线中点的磁感应强度。通过改变亥姆霍兹线圈中电流的正、反方向,测量了延安地区当地的地磁场强度及磁倾角。测量结果与延安地区当地的地磁场要素基本相符,说明该方法是确实可行的。该实验方案充分利用了实验室现有仪器,培养了学生的创新意识,因此在实验课教学中具有较高的推广价值。

关键词: 地磁场;亥姆霍兹线圈;磁场强度

中图分类号: O441.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.4060

Using the Helmholtz coil to measure the magnetic field strength and magnetic inclination

Liu Zhuqin

(College of physics and Electronic Information, Yan'an University, Yan'an 716000, China)

Abstract: The FD-HM-I Helmholtz coil, using high sensitivity of milli Tesla meter, magnetic induction intensity detection Helmholtz coil common axis point. Through the positive, reverse direction change current Helmholtz coil in the Yanan area, accurate measurement of the local magnetic field strength and magnetic inclination.

Keywords: magnetic field; the Helmholtz coil; magnetic field intensity

1 引言

地磁场的数值比较小,但在直流磁场,特别是弱磁场测量中,往往需要知道其数值,并设法消除它对测量结果的影响^[1-5]。“地磁场水平分量的测量”是一个传统的物理实验项目,一般采用的方法是正切电流计法^[6]。为了拓宽地磁场强度的测量方法,实验工作者又采用磁聚焦测量法^[7]、磁阻传感器测量法^[8]、霍尔元件测量法^[9]、电子自旋共振法^[10]等。提出一种新的测量方法,即采用FD-HM-I型亥姆霍兹线圈,利用高灵敏度毫特斯拉计,探测亥姆霍兹线圈公共轴线中点的磁感应强度,通过改变亥姆霍兹线圈中电流的正、反方向,精确地测量了延安地区当地的地磁场强度及磁倾角。

2 测量原理

2.1 亥姆霍兹线圈轴线上的磁场分布

亥姆霍兹线圈是由一对半径 R 、匝数 N 均相同的圆线

圈组成,两线圈彼此平行而且共轴,线圈间距离正好等于圆线圈的半径 R 。亥姆霍兹线圈轴线中心处的磁感应强度 B_0 为^[6]:

$$B_0 = \frac{8}{5^{3/2}} \frac{\mu_0 NI}{R} \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率, N 为线圈匝数, I 为通过线圈的电流强度。因此亥姆霍兹线圈的特点是能在其公共轴线中点附近产生较广的均匀磁场区,所以在生产和科研中有较大的使用价值。

2.2 地磁场的测量

使亥姆霍兹线圈的轴线与罗盘磁针方向一致,若通正向电流,亥姆霍兹线圈在轴线中心产生的磁场为 B_0 ,考虑地磁场的影响,亥姆霍兹线圈轴线中心的磁场 $B(h_1)$ 应为亥姆霍兹线圈在中心产生的磁场为 B_0 与地磁场水平分量 $B_{水平}$ 的合成,即:

$$B(h_1) = B_0 + B_{水平} \quad (2)$$

收稿日期:2014-05

* 基金项目:陕西省2013年科学技术研究发展计划(2013K02-14)、延安市2013年科学技术研究发展计划(2013-KN37)、陕西省高水平大学建设专项资金(物理学2012SXTS05)资助项目

若通反向电流,亥姆霍兹线圈在中心产生的磁场为 $-B_0$,考虑地磁场的影响,亥姆霍兹线圈中心的磁场 $B(h_2)$ 应为亥姆霍兹线圈在中心产生的磁场 $-B_0$ 与地磁场水平分量 $B_{\text{水平}}$ 的合成,即:

$$B(h_2) = -B_0 + B_{\text{水平}} \quad (3)$$

由于地磁场的这种影响无论是大小还是方向都是恒定的,所以在测定 B_0 时往往采用将电流正、反两次测定磁场后再取其平均值的方法,以消除地磁场的影响。

这种将电流正、反两次测定磁场后再取其平均值的方法,不但能消除地磁场的影响,同样也可测定地磁场。由式(2)(3)可得:

$$B_{\text{水平}} = \frac{B(h_1) + B(h_2)}{2} \quad (4)$$

使亥姆霍兹线圈的轴线竖直,若通正向电流,载流圆线圈在中心产生的磁场为 B_0 ,考虑地磁场的影响,亥姆霍兹线圈中心的磁场 $B'(h_1)$ 应为亥姆霍兹线圈在中心产生的磁场为 B_0 与地磁场垂直分量 $B_{\text{垂直}}$ 的合成,即:

$$B'(h_1) = B_0 + B_{\text{垂直}} \quad (5)$$

若通反向电流,亥姆霍兹线圈在中心产生的磁场为 $-B_0$,考虑地磁场的影响,亥姆霍兹线圈中心的磁场 $B'(h_2)$ 应为亥姆霍兹线圈在中心产生的磁场为 $-B_0$ 与地磁场垂直分量 $B_{\text{垂直}}$ 的合成,即:

$$B'(h_2) = -B_0 + B_{\text{垂直}} \quad (6)$$

由式(5)(6)可得:

$$B_{\text{垂直}} = \frac{B'(h_1) + B'(h_2)}{2} \quad (7)$$

将亥姆霍兹线圈的轴线调整到与罗盘磁针N极所指的方向一致,使亥姆霍兹线圈轴向磁场方向与地磁场水平分量的方向相互平行,进行测量,将测量得到的 $B(h_1)$ 、 $B(h_2)$ 代入式(4)得到的就是地磁场磁感应强度的水平分量 $B_{\text{水平}}$ 的大小,根据 $B(h_1)$ 、 $B(h_2)$ 的大小判断其方向。再借助铅垂线把亥姆霍兹线圈的轴线调整到竖直,进行测量,将测量得到的 $B'(h_1)$ 、 $B'(h_2)$ 代入式(7)得到的就是地磁场磁感应强度的垂直分量 $B_{\text{垂直}}$ 的大小,同样根据 $B'(h_1)$ 、 $B'(h_2)$ 的大小判断其方向。地磁场总磁感应强度的大小用 $B_{\text{地磁场}}$ 表示:

$$B_{\text{地磁场}} = \sqrt{B_{\text{水平}}^2 + B_{\text{垂直}}^2} \quad (8)$$

磁倾角用地磁场总磁感应强度与地磁场水平方向的夹角 I 来表示^[1], $\text{tg}I = \frac{B_{\text{垂直}}}{B_{\text{水平}}}$,即:

$$I = \arctan \frac{B_{\text{垂直}}}{B_{\text{水平}}} \quad (9)$$

用式(8)、(9)即可计算出地磁场的大小和方向。

3 实验仪器与实验方法

3.1 实验仪器

本实验采用了上海复旦天欣科教仪器有限公司生产的FD-HM-I新型亥姆霍兹线圈磁场测定仪及实验平台(台面上有等距离1.0 cm间隔的网格线),线圈匝数为500匝,线圈平均半径为10.0 cm,高灵敏度三位半数字毫特斯拉计(采用SS95A型集成霍耳传感器,配直流数字电压表)制成的,三位半数字电流表及直流稳流电源组合仪1台,传感器探头及连接线等。

3.2 实验方法

1)将亥姆霍兹线圈用固定架安装在大理石台面上,应使大理石台面处于线圈的轴线位置,根据线圈内外半径及沿半径方向支架厚度,用不锈钢钢尺测量台面至线圈架平均半径端点对应位置的距离,并适当调整固定架,直至满足台面通过亥姆霍兹线圈的轴心位置。调节和移动4个固定架,改变两线圈之间的距离,用不锈钢钢尺测量两线圈间距或根据台面上的网格线确定两线圈间距,使两线圈间距为10.0 cm。

2)开启电源,预热10 min后可以测量。

3)将亥姆霍兹线圈的法线方向调整到与罗盘磁针N极所指的方向一致,使亥姆霍兹线圈轴向磁场方向与地磁场水平分量的方向相互平行,移走罗盘,将传感器探头置于亥姆霍兹线圈轴线中心位置,并调整传感器探头的方向,使传感器探头的法线方向与亥姆霍兹线圈轴线垂直,调节毫特斯拉计调零旋钮,使毫特斯拉计显示为零,再调整传感器探头的方向,使传感器探头的法线方向与亥姆霍兹线圈轴线一致,即与地磁场水平分量的方向一致,然后给亥姆霍兹线圈通 $I = 100 \text{ mA}$ 的正向电流,记录毫特斯拉计显示的数值 $B(h_1)$,再给亥姆霍兹线圈通 $I = 100 \text{ mA}$ 的反向电流,记录毫特斯拉计显示的数值 $B(h_2)$,将测量得到的 $B(h_1)$ 、 $B(h_2)$ 代入式(4)即可得到 $B_{\text{水平}}$ 的大小,重复测量8组数据,取其平均值。

4)借助铅垂线把亥姆霍兹线圈轴线及大理石台面调整到竖直,调整传感器探头的方向,使传感器探头的法线方向与亥姆霍兹线圈轴线一致,即与地磁场垂直分量的方向一致,然后给亥姆霍兹线圈通 $I = 100 \text{ mA}$ 的正向电流,记录毫特斯拉计显示的数值 $B'(h_1)$,再给亥姆霍兹线圈通 $I = 100 \text{ mA}$ 的反向电流,记录毫特斯拉计显示的数值 $B'(h_2)$,将测量得到的 $B'(h_1)$ 、 $B'(h_2)$ 代入式(7)即可得到 $B_{\text{垂直}}$ 的大小,重复测量8组数据,取其平均值。

4 测量举例

4.1 地磁场水平分量的测量

利用亥姆霍兹线圈测量地磁场磁感应强度水平分量,测量数据如表1所示。

表1 地磁场水平分量测量数据

$B(h_1)/\text{mT}$	0.474	0.475	0.475	0.476	0.475	0.477	0.475	0.475
$B(h_2)/\text{mT}$	-0.424	-0.423	-0.2423	-0.423	-0.424	-0.422	-0.424	-0.423

由表1得 $\bar{B}(h_1) = 0.475 \text{ mT}$, $\bar{B}(h_2) = -0.423 \text{ mT}$ 。

将上面测量数据代入式(4)得,地磁场磁感应强度的水平分量, $\bar{B}_{\text{水平}} = 0.026 \text{ mT}$ 。

由 $B(h_1)$ 、 $B(h_2)$ 的大小可以判断,地磁场磁感应强

度水平分量的方向与罗盘磁针 N 极所指方向一致。

4.2 地磁场垂直分量的测量

利用亥姆霍兹线圈测量地磁场磁感应强度垂直分量,测量数据如表2所示。

表2 地磁场垂直分量测量数据

$B'(h_1)/\text{mT}$	0.416	0.415	0.415	0.417	0.416	0.415	0.415	0.416
$B'(h_2)/\text{mT}$	-0.496	-0.495	-0.497	-0.497	-0.495	-0.497	-0.496	-0.497

由表2得 $\bar{B}(h_1) = 0.416 \text{ mT}$, $\bar{B}(h_2) = -0.496 \text{ mT}$,

将上面数据代入式(7)得,地磁场磁感应强度的垂直分量, $\bar{B}_{\text{垂直}} = -0.040 \text{ mT}$,负号表示了地磁场磁感应强度垂直分量的方向,由 $B'(h_1)$ 、 $B'(h_2)$ 的大小也可以判断,地磁场磁感应强度垂直分量的方向与重锤所指方向一致。

4.3 地磁场总磁感应强度及磁倾角的计算

将测量得到的地磁场磁感应强度水平分量 $\bar{B}_{\text{水平}}$ 和地磁场磁感应强度垂直分量 $\bar{B}_{\text{垂直}}$ 分别代入式(8)、(9)可得地磁场总磁感应强度的大小及磁倾角为:

$$B_{\text{地磁场}} = \sqrt{\bar{B}_{\text{水平}}^2 + \bar{B}_{\text{垂直}}^2} = 4.771 \times 10^{-2} \text{ mT}$$

$$I = 56.9^\circ$$

5 结 论

利用亥姆霍兹线圈,测量了地磁场磁感应强度及磁倾角,测量结果与延安地区当地的地磁场基本相符,说明该方法是确实可行的。实验过程简单,测试速度快,该实验方案充分利用了实验室现有的仪器,拓宽了地磁场磁感应强度的测量方法,提高了仪器的利用率,培养了学生的创新意识。

参考文献

- [1] 郭淑霞,董中要,刘孟江,等.复杂电磁环境模拟技术研究[J].国外电子测量技术,2013,32(7):21-25.
- [2] 葛健,赵志卓,董浩斌,等.直流脉冲极化质子旋进磁仪磁场传感器的设计[J].仪器仪表学报,2014,

35(4):850-858.

- [3] 谢完成,戴瑜兴.一种新的基于霍尔传感器的电流测量方法[J].电子测量与仪器学报,2012,26(8):705-710.
- [4] 曾金芳,腾召胜.单传感器数据处理最大熵方法[J].电子测量与仪器学报,2012,26(12):1096-1099.
- [5] 张振,徐科军,杨双龙,等.具有快速响应的电磁流量计高低压励磁系统[J].电子测量与仪器学报,2013,27(6):562-571.
- [6] 杨述武.普通物理实验(电磁学部分)[M].4版.北京:高等教育出版社,2007:126-127,239-243.
- [7] 王玉清,杨德甫.利用磁聚焦法测量地磁场的研究[J].大学物理,2009,28(7):36-38.
- [8] 杨春振,李可然.新型各向异性磁阻传感器在地磁场测量中的应用[J].大学物理,2012,31(6):57-59.
- [9] 刘竹琴.利用电子自旋共振测量地磁场强度及磁倾角[J].大学物理,2012,31(6):37-40.
- [10] 杨德甫,杨能勋.用射频段电子自旋共振信号图测定地磁场强度[J].延安大学学报:自然科学版,2009,28(3):37-39.

作者简介

刘竹琴,1968年出生,副教授。主要研究方向为实验物理的教学和科研工作。