

doi: 10.11720/wtyht.2019.0123

赵毅,陈晓东,黄跃,等.适用于浅水区工作的三分量感应式磁场传感器研制[J].物探与化探,2019,43(6):1326-1332.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0123

Zhao Y, Chen X D, Huang Y, et al. The development of three-component inductive magnetic field sensor suitable for shallow water work[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(6): 1326-1332. http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0123

适用于浅水区工作的三分量感应式 磁场传感器研制

赵毅^{1,2}, 陈晓东^{1,2}, 黄跃^{1,2}, 王刚¹, 李永博¹, 赵富刚¹, 王书民^{1,2}

(1. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 自然资源部 地球物理
电磁法探测技术重点实验室, 河北 廊坊 065000)

摘 要: 感应式磁场传感器广泛应用于地球物理电磁法勘探中, 受物理原理制约, 该类磁场传感器的噪声水平与其长度和体积成正比, 长度通常为 800~1 400 mm, 质量在 3~6 kg。本文采用一种磁通聚集技术, 突破了传统感应式磁场传感器的设计瓶颈, 能大幅度降低传感器的长度, 研制的用于 AMT 方法的超小型感应式磁场传感器单个分量长度 < 240 mm, 长度约为传统 AMT 磁场传感器的 30%, 直径 < 110 mm, 质量约 3 kg, 工作频率范围为 0.1 Hz ~ 10 kHz, 噪声水平在 1 Hz 处为 $0.8 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。将三个参数相同的磁场传感器相互垂直安装到一块底板上, 构成三分量感应式磁场传感器, 其体积为 255 mm×255 mm×255 mm, 质量约 10 kg。通过安装定向器测量其倾角和方位角, 并进行磁场数据校正, 实现其在任何姿态下的测量数据有效; 通过安装防水外罩实现其在浅水区有效工作。野外实验表明: 该三分量磁场传感器既可布置在地面上, 又可布置在浅水区开展 AMT 工作, 可极大地提高野外施工效率, 具有广阔的应用前景。

关键词: 三分量; 感应式磁场传感器; 磁通聚集; 姿态测量; 数据校正

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2019)06-1326-07



0 引言

感应式磁场传感器做为地球物理电磁法勘探仪器的信号接收部件已达到广泛应用^[1], 特别是在可控源音频大地测量(CSAMT)、音频大地电磁测量(AMT)、大地电磁测深(MT)和瞬变电磁(TEM)等方法中为提取地下弱磁场信号提供了一种可靠的工具。

感应式磁场传感器的工作原理为法拉第电磁感应定律, 它将变化的磁场转变为电压量输出, 输出电压量的大小和所采用的线圈的匝数、面积、被测磁场频率成正比。感应式磁场传感器主要由三部分组成: 高导磁率磁棒、多匝线圈和低噪声放大器。为了

提高磁场传感器的灵敏度, 需要磁棒有足够的长径比(一般大于 50)以达到足够大的有效导磁率, 在地面上应用的磁场传感器长度都比较大, 一般为 800~1 400 mm, 如开展三分量测量, 需要分别布置三根传感器, 传感器的布置方向和水平度也需要调整, 在地形差的地区给野外施工带来不便, 如果在浅水区根本就无法使用。

国外开展感应式磁场传感器研究较早, 技术比较成熟, 其性能指标较高。国内多家单位都开展了感应式磁场传感器的研究^[2-4], 如地科学院物化探研究所、中船 722 研究所、中科院电子所、吉林大学、中南大学。然而, 国内外所研制的磁场传感器是常规的仅用于地面测量, 未见有应用于浅水区的三分量感应式磁场传感器产品。

收稿日期: 2019-03-12; 修回日期: 2019-06-11

基金项目: 中国地质科学院基本科研业务费资助项目(YYWF201732)

作者简介: 赵毅(1969-), 男, 2001 年毕业于中国地质大学, 获硕士学位, 教授级高工, 现主要从事电磁法传感器研制工作。Email: thisyz@sina.

近年来,中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所在地质大调查项目的资助下,成功研制出应用于 CSAMT 和 AMT 的 IGGE-30 磁场传感器^[5],其工作频率范围为:0.1 Hz~10 kHz,噪声指标在 1 Hz 处为 0.5 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$,优于国内外同类产品;成功研制出应用于 MT 的 IGGE-80 磁场传感器,其工作频率范围为:0.0001 Hz~1 kHz,噪声指标在 1 Hz 处为 100 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$,与国外同类产品性能相当,为感应式磁场传感器国产化打下了坚实的基础。

本文在现有工作基础上突破常规的感应式磁场传感器设计方法,采用磁通聚集技术,该技术最早由法国学者 Mansour 用于磁阻磁场传感器上^[6],用于增加其灵敏度;国内吉林大学邵英秋博士对此技术也开展过研究^[7]。笔者通过优化磁棒结构,使得较短磁棒的有效导磁率与常规磁棒相当,从而实现小型化,把三根磁场传感器集成到一个箱体中,相互垂直布置,实现三个分量(H_x 、 H_y 、 H_z)同时测量。另外,在箱体上集成定向传感器记录三分量磁场传感器的姿态,箱体外加上防水外壳,这样即可实现在浅水区的三分量磁场测量。该三分量磁场传感器的工作范围为:0.1 Hz~10 kHz,噪声指标在 1 Hz 处为 0.8 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$,虽然比地面上现有的同类传感器略高,但其体积小,防水性好,野外布置方便,可在浅水区工作。这也将为深海大地电磁测量打下坚实的基础。

1 三分量感应式磁场传感器设计

感应式磁传感器的工作原理和设计方法笔者和其他学者已进行过深入阐述^[8],本文将不在复述,仅对设计中不同的部分进行阐述。

1.1 主体结构设计

感应式磁场传感器通常由三部分组成:高导磁率磁棒、多匝线圈和低噪声前置放大器。常规的高导磁率磁棒通常采用圆柱体或长方体,其磁路是非闭合的,存在退磁场,在退磁场的作用下,有效磁导率远远小于材料初始磁导率,为满足长径比的要求,一般长度比较大,如采用常规尺寸磁棒因体积庞大无法将其集成到一个箱体内。本文采用磁通聚集技术,优化磁棒结构,使得较短磁棒的有效导磁率与常规磁棒相当,从而实现小型化。其形状如图 1 所示,两侧采用直径为 D 、厚度为 t 的软磁性铁氧体材料,中间部分采用直径为 d 、长度为 $(l-2t)$ 的常规圆柱形高导磁率磁棒,和常规磁芯相比,长度较短,多匝线圈均匀绕在中间的磁棒上,该结构可有效增加磁

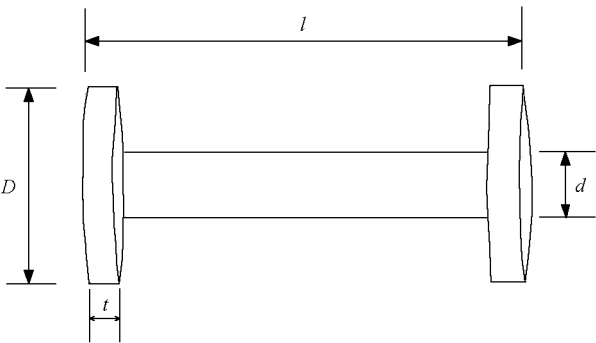


图 1 磁通聚集器磁芯结构示意图

Fig.1 Schematic of magnetic flux concentrator structure

棒的有效磁导率。

磁芯的退磁因子决定其有效导磁率,同时退磁因子也是磁芯位置的函数,而磁通聚集器的设计改变了磁芯的形状,也就改变了磁芯有效导磁率的分布。从磁路分析,由于磁通聚集器的直径相对较大,使得在空间中有较大面积磁阻较低,这对磁感线起汇聚作用。在外磁场较弱的情况下,磁芯内部有效磁场可以较容易地得到提高,实现了提高有效导磁率的目的。从理论上计算带有磁通聚集器磁芯的有效导磁率是十分困难的,可以通过有限元软件 Comsol 来计算出理论结果。根据磁棒的导磁率公式:

$$\mu_{\text{app}} = \frac{\mu_r}{1 + N(\mu_r - 1)}, \tag{1}$$

式中: μ_{app} 为磁棒有效导磁率, μ_r 为磁棒材料的初始磁导率, N 为退磁因子(与磁棒的长径比有关)。磁芯材料采用高导磁率的坡莫合金,磁棒长度为 200 mm,直径为 12 mm,在中心处绕制线圈 3 000 匝,此时测量线圈的电感为 10 H。磁通聚集器采用直径为 100 mm,厚度为 10 mm 的铁氧体软磁性材料,测量线圈的电感为 40 H,采用磁通聚集器后电感值提高了 4 倍,即有效导磁率提高了 4 倍,满足设计要求。

线圈采用分段绕制方式,分 4 段,3 000 匝/段,总匝数为 12 000 匝,均匀绕制在磁棒表面,有效降低其分布电容,提高工作频率范围。

前置放大器采用磁通反馈技术,为降低磁传感器的噪声,低噪声前置放大器^[9]的第一级选用噪声低、频率特性好的对管 LM394,其电压噪声为 1.8 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$,采用差分输入,降低共模噪声,电路原理如图 2 所示。由两级放大加一级低通滤波组成,整个电路的放大倍数为 8 000 倍,等效输入噪声为 3 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。

第一级的差模增益为：

$$A_{v1} = -\beta R_1 / r_{be} \quad (2)$$

式(2)中电阻 R_1 与电阻 R_2 取相同的阻值 $400\text{ k}\Omega$, β 是三极管的直流放大倍数, r_{be} 是三极管的基极电阻。 β 值为 400 , r_{be} 值为 $2\text{ M}\Omega$, 由式(1)计算得到其差模增益为 80 倍。

第二级同样采用差分放大电路, 运放 AR1 选用高输入阻抗 JFET 运放 AD711, 当 $R_4 = R_5$, $R_6 = R_7$, 其频率响应特性为：

$$A_{v2} = \frac{1}{1 + j\omega R_6 C_1} \cdot \frac{R_6}{R_4} \quad (3)$$

式(3)中取 $R_4 = 1\text{ k}\Omega$; $R_6 = 100\text{ k}\Omega$; $C_1 = 47\text{ pF}$ 时, 经计算得到电路的 -3 dB 带宽为 10 kHz , 带宽内增益为 100 倍。

最后一级为二阶低通滤波电路, AR2 选用低噪声运放 OP27, 当 $R_{10} = R_{11} = 9\text{ k}\Omega$; $C_3 = C_4 = 1\text{ 000 pF}$

时, 电路增益为 1 , -3 dB 带宽为 10 kHz , 其作用是限制传感器带宽, 降低高频噪声。

上述设计是单个分量的磁场传感器, 把 3 个参数同样的磁场传感器相互垂直安装到一块底板上, 通过机械加工安装保证相互垂直度小于 1° , 构成三分量感应式磁场传感器(见图 3 所示), 其体积为 $255\text{ mm} \times 255\text{ mm} \times 255\text{ mm}$ 。

1.2 防水、耐压设计

三分量磁场传感器为适用于浅水区 (20 m 以内) 工作, 其防水、耐压性必须满足设计要求。本设计在三分量磁场传感器的外面加一个防水罩, 如图 4 所示, 采用玻璃钢材料, 壁厚约 8 mm , 外观似钟形, 流线型设计, 在流动的水中阻力小, 容易保持三分量磁场传感器的稳定性。该防水罩经机械工业仪器仪表综合技术经济研究所测量控制设备及系统实验室机械工业测量控制设备及网络质量检验中心测试,

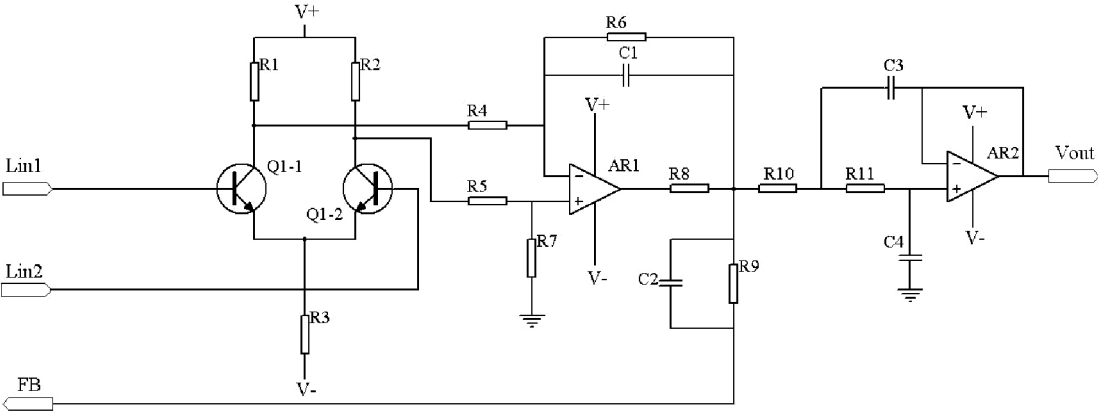


图 2 低噪声前置放大电路图

Fig.2 Low noise amplification circuit diagram



图 3 三分量感应式磁场传感器外形图

Fig.3 Three-component inductive magnetic field sensor shape diagram



图 4 三分量磁场传感器防水罩

Fig.4 Three-component magnetic field sensor Waterproof cover



图 5 安装了定向器的三分量磁场传感器

Fig.5 Three-component magnetic field sensor with directional device installed

耐压达到 0.2 MPa,防水性达到 IPX8 最高级,完全满足设计要求。

2 三分量磁场传感器姿态测量

三分量磁场传感器由于要放到水下使用,其倾角和方位角必须知道,根据此角度把测得的磁场校准到标准方向(正南北、东西)或某一个方向。为此采用美国生产的定向器 544 H,其主要指标为:方位角精度±1°;倾角精度±0.5°,满足设计要求。把它安装到三分量磁场传感器箱体上面(见图 5 所示),该传感器测得的数据是相互垂直的三个方向的磁场值(H_x 、 H_y 、 H_z)、三个方向的重力值(g_x 、 g_y 、 g_z),由这些数据经过计算最终得到三分量磁场传感器在水下的姿态(倾角和方位角)。

2.1 三分量坐标系确定及倾角、方位角计算^[10-13]

定义坐标系如图 6 所示,如此定义坐标系的理由是: x 为北、 y 为东,这样可使其与大地坐标的北(x)、东(y)一致,亦即与地形图的坐标一致; z 为下,与大地电磁教科书的多数示意图中的磁场方向一致; x 、 y 、 z 三个分量的正方向适用于右手定则(右手笛卡尔坐标系)。

由重力参数计算倾角 ε :

$$g = (g_x^2 + g_y^2 + g_z^2)^{1/2}, \tag{4}$$

$$\cos\varepsilon = \frac{g_z}{g}, \tag{5}$$

$$\sin\varepsilon = \frac{(g_x^2 + g_y^2)^{1/2}}{g}, \tag{6}$$

$$\tan\varepsilon = \frac{(g_x^2 + g_y^2)^{1/2}}{g_z}。 \tag{7}$$

由重力、磁性参数计算的方位角 ϕ :

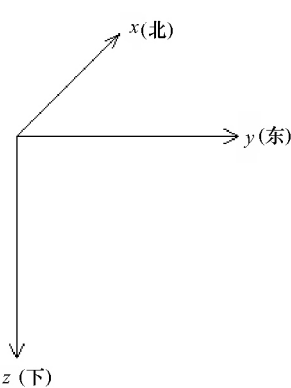


图 6 三分量坐标系定义

Fig.6 Three-component coordinate system definition

$$H_{x'} = \frac{H_x \cdot g_y + H_y \cdot g_x}{(g_x^2 + g_y^2)^{1/2}}, \tag{8}$$

$$H_{y'} = \frac{H_x \cdot g_x + H_y \cdot g_y + H_z \cdot g_z}{g}, \tag{9}$$

$$H_{z'} = \frac{H_z \cdot (g_x^2 + g_y^2) - H_x \cdot g_x \cdot g_z - H_y \cdot g_z \cdot g_y}{g \cdot (g_x^2 + g_y^2)^{1/2}}; \tag{10}$$

$$\cos\phi = \frac{H_{z'}}{(H_{z'}^2 + H_{x'}^2)^{1/2}}, \tag{11}$$

$$\sin\phi = \frac{-H_{x'}}{(H_{z'}^2 + H_{x'}^2)^{1/2}}, \tag{12}$$

$$\tan\phi = \frac{-H_{x'}}{H_{z'}}。 \tag{13}$$

定向器各角度的定义见图 7。

2.2 三分量磁场数据校正计算^[14]

三分量磁场传感器测得的分别是 x 、 y 、 z 法线方向上的磁场值,为将其观测结果校正至图 6 的坐标系上,校正计算公式如下:

$$H_{xy0} = (H_{x0}^2 + H_{y0}^2)^{1/2}, \tag{14}$$

$$H_z = H_{z0} \cdot \cos(\varepsilon - \varphi_z) + H_{xy0} \cdot \sin(\varepsilon - \varphi_z), \tag{15}$$

$$H_x = H_{x0} \cdot \cos(\theta_m - \varphi_x) - H_{y0} \cdot \sin(\theta_m - \varphi_y), \tag{16}$$

$$H_y = H_{x0} \cdot \sin(\theta_m - \varphi_x) + H_{y0} \cdot \cos(\theta_m - \varphi_y)。 \tag{17}$$

上述式(14)、(15)、(16)、(17)中 H_{x0} 、 H_{y0} 、 H_{z0} 为实测的感应电动势数据, φ_x 、 φ_y 、 φ_z 分别为磁场传感器的北、东、下轴至定向器相应轴的夹角(逆时针为正,顺时针为负); H_x 、 H_y 、 H_z 为经三分量校正计算后的磁场结果数据。

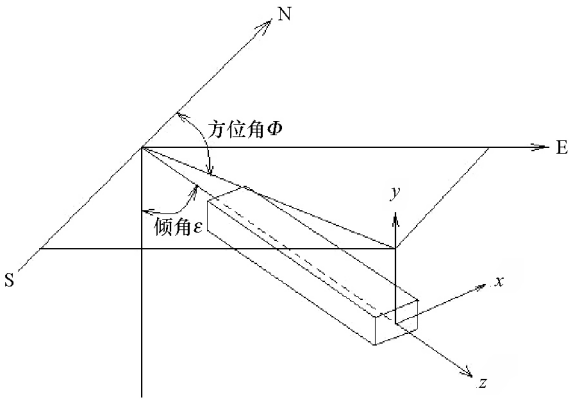


图 7 定向器角度示意图

Fig.7 Orientation diagram of the directional device

3 三分量磁场传感器测试结果

三分量磁场传感器研制完成后,先后在实验室内和野外环境中开展了性能指标和有效性测试,测试结果如下。

3.1 室内测试

实验室内主要测试三分量磁传感器的灵敏度和噪声,测试方法在参考文献中已阐述^[8,15],在此不再重述。由于三个分量的性能一致性很好,在此仅给出 z 分量的灵敏度和噪声曲线(图8),工作频率范围为0.1~10 000 Hz,灵敏度平坦部分为200 mV/nT,噪声在1 kHz处为5.5 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$,与地面常规磁场传感器相比噪声略大一些,地面一般为4 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$,没有数量级上的差别,因此,可以满足设计要求。

3.2 野外对比测试

本文研制的三分量磁场传感器分别在河北固安县和安新县开展了地面和水下的AMT对比试验,试验仪器有3根国外知名常规磁场传感器、2台国外知名大地电磁接收机。

首先,开展地面实验,在同一地点分别接本文的三分量磁场传感器和国外常规磁场传感器,布置方

式按标准的AMT进行,本文三分量磁场传感器布置方向与国外知名常规磁场传感器布置方向相同,电道两台接收机共用一套,同时记录45 min,视电阻率对比曲线见图9。两种磁场传感器所获得的视电阻率曲线走势一致,说明本文研制的三分量磁场传感器是有效的。

然后,国外知名常规磁场传感器正南北、东西布置,三分量磁传感器顺时针旋转30°布置,其他布置方式同上,在同一地点同时记录45 min,把三分量磁场传感器测得的数据按照上述的校正方法校正到正南北、东西方向,然后进行视电阻率计算,得到一组视电阻率曲线,与国外知名常规磁场传感器测得的视电阻率曲线对比(图10),两种磁场传感器所获得的视电阻率曲线走势一致,说明本文研制的三分量磁场传感器在旋转角度后取得的数据经校正后依然有效。同样我们也做其他不同角度的试验,限于篇幅在此不再一一列出。经过这些实验,证明了三分量磁场传感器无论姿态怎样,取得的数据经校正后有效,这就为三分量磁场传感器放入水下工作提供了依据。

最后,在河北安新县白洋淀开展三分量磁场传感器的水下AMT试验,国外知名常规磁场传感器布

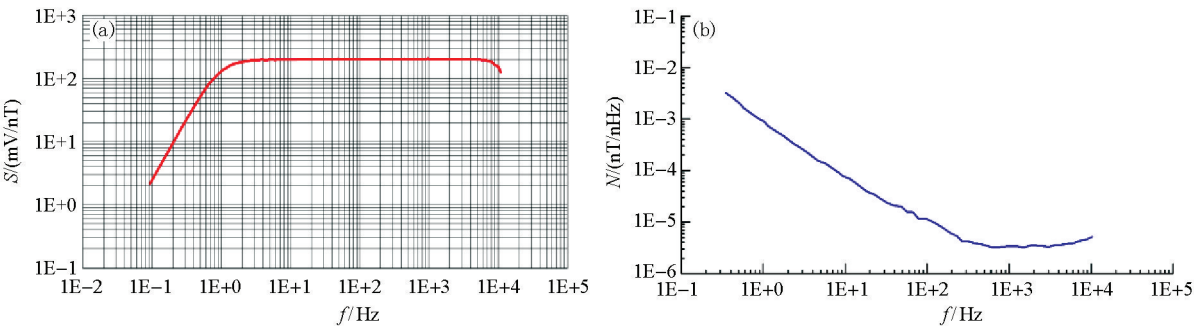


图8 三分量磁场传感器 z 分量灵敏度曲线(a)和噪声曲线(b)

Fig.8 Z component sensitivity curve(a) & noise curve(b) of the three-component magnetic field sensor

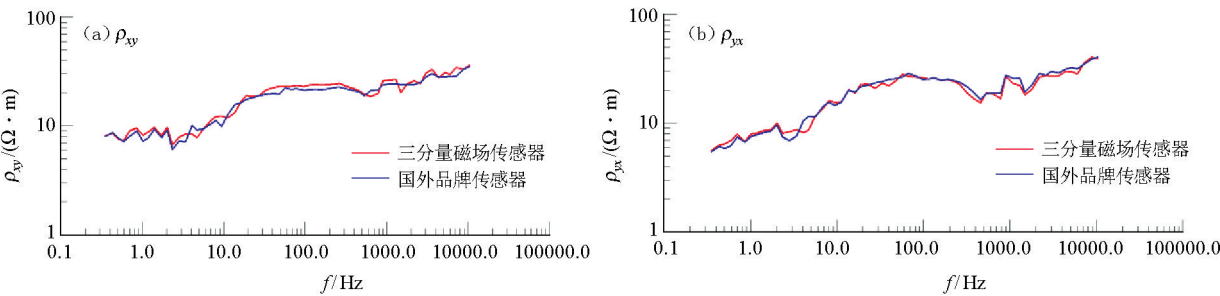


图9 地面测试视电阻率曲线对比

Fig.9 Comparison of apparent resistivity curves obtained from ground test

置在白洋淀岸边陆地上,正南北、东西布置,三分量磁场传感器距离岸边 10 m 左右放入大约 6 m 深的水底,两台接收机共用电道,同时记录 60 min,三分量磁场传感器先用定向器 544H 测量其姿态(倾角和方位角),然后把取得的磁场数据进行校正到正南北、东西方向,最后再计算视电阻率。从图 11 所示的视电阻率对比曲线可以看出,两种磁场传感器

所获得的视电阻率曲线走势一致,在中频段吻合较好,在低频区误差较大,在 2 kHz~7 kHz 区间内视电阻率下降大,原因是在该区域内天然磁场信号处于“死频区”,信号弱,磁场传感器输出的信号噪声比差,故计算出的视电阻率也不准确。经过三分量磁场传感器的水下试验证明,本文研制的适用于浅水区的三分量磁场传感器是可靠的、有效的。

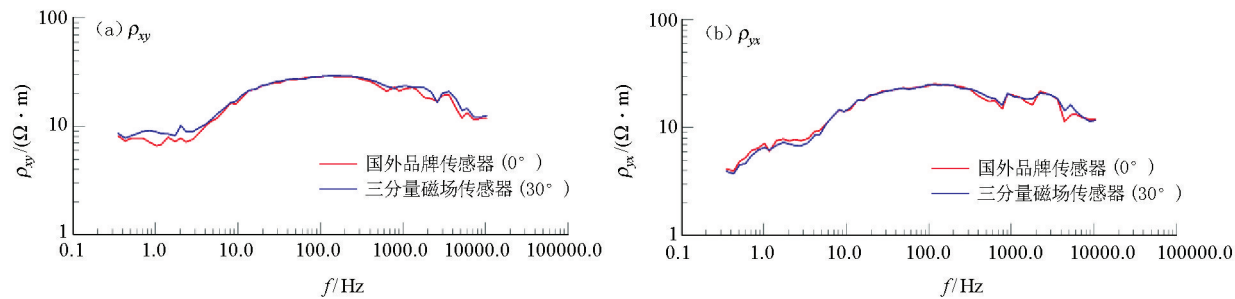


图 10 旋转测试视电阻率曲线对比

Fig.10 Comparison of apparent resistivity curves obtained by rotation test

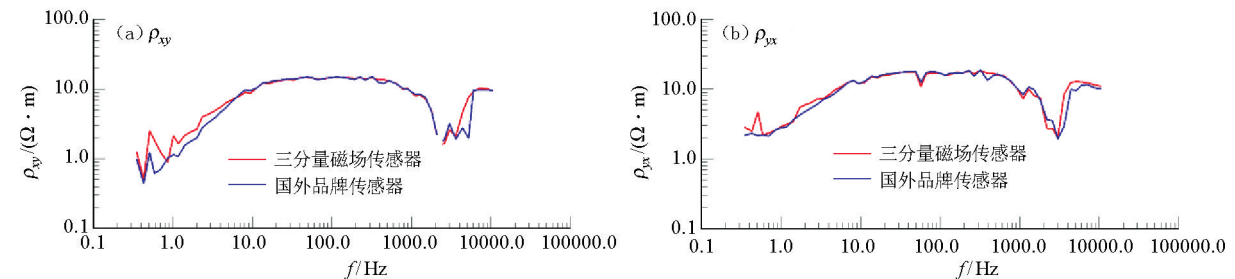


图 11 水下 AMT 测试视电阻率曲线对比

Fig.11 Comparison of apparent resistivity curves obtained by underwater AMT test

4 结论

本文在现有工作基础上,采用磁通聚集磁芯结构、姿态测量技术,实现了一种小型化的适用于浅水区工作的三分量磁场传感器。其主体尺寸为:255 mm×255 mm×255 mm,质量为 10 kg,工作频率范围为 0.1 Hz~10 kHz,噪声指标在 1 Hz 处为 0.8 pT/√Hz,与地面上现有的同类单分量磁传感器相比略高,但其体积小,单个分量长度减小约 2/3,防水性好。实验室和野外测试结果表明:本文所研制的三分量磁场传感器可用于 AMT 方法作业,既可布置在地面上工作,又可布置在浅水区工作,野外施工方便。在此基础上研制工作频率更低、噪声更低、应用于 MT 的三分量磁场传感器,可用于海底 MT 方法勘探,这将为深海大地电磁测量打下坚实的基础,具有良好的应用前景。万方数据

参考文献(References):

[1] 巨汉基,朱万华,方广有.磁芯感应线圈传感器综述[J].地球物理学进展,2010,25(5):1870-1876. doi:10.3969/j.issn.1004-2903.2010.05.047.
Ju H J, Zhu W H, Fang G Y. A review on ferromagnetic induction coil sensors[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(5): 1870 - 1876. doi:10.3969/j.issn.1004 - 2903.2010.05.047.
[2] 王言章,程德福,王君,等.基于纳米晶合金的宽频差分式磁场传感器的研究[J].传感技术学报,2007,20(9):1967-1969.
Wang Y Z, Cheng D F, Wang J, et al. Research on broadband frequency difference magnetic field sensor based on nanocrystalline alloy [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20 (9): 1967 - 1969.
[3] 陈兴朋,宋刚,周胜,等.音频大地电磁场传感器的研制[J].中国有色金属学报,2012,22(3):1-6.
Chen X P, Song G, Zhou S, et al. Development of magnetic sensor in audio-frequency magnetotelluric sounding[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(in Chinese), 2012, 22(3): 1 - 6.
[4] 陈志毅,周穗华,吴志东.低频感应式磁传感器优化设计[J].四

川兵工学报,2013,34(4):123-126.

Chen Z Y, Zhou S H, Wu Z D. Optimization of induction magnetic sensors at lower frequency [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013,34(4):123-126.

[5] 赵毅,陈晓东,王刚,等. 频率域感应式磁传感器信号调理电路研究[J]. 物探化探计算技术,2016,38(2):198-205.

Zhao Y, Chen X D, Wang G, et al. Research for Signal adjustment electric circuit of Inductive Magnetism Transducer in the frequency domain[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2016,38(2):198-205.

[6] Mansour M, Coillot C, Chanteur G, et al. Design of magnetic concentrators for high sensitivity anisotropic magnetoresistor devices [J]. J. Appl. Phys., 2010,107(9):1-3.

[7] 邵英秋,王言章,程德福,等.高灵敏度感应式磁场传感器的研究[J].仪器仪表学报,2012,33(2):349-355.

Shao Y Q, Wang Y Z, Cheng D F, et al. Research of high sensitivity inductive magnetic sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2012,33(2):349-355.

[8] 邵英秋,王言章,程德福,等.基于磁反馈的宽频带磁传感器的研制[J].仪器仪表学报,2010,31(11):2461-2466.

Shao Y Q, Wang Y Z, Cheng D F, et al. Development of broad frequency band magnetic field sensor based on flux feedback[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010,31(11):2461-2466.

[9] 袁真,李海. 低噪声运放前置放大器的实用设计[J].仪表技术,2000(6):20-22.

Yuan Z, Li H. Low noise operational amplifier and practical design of the preamplifier[J]. Instrument technique, 2000(6):20-22.

[10] 黄跃,沈钟,冯晓兰,等. TEM 井中磁探头的校准装置及校准方法[P].中国专利:2231480,2016-09-07.

Huang Y, Shen Z, Feng X L, et al. Calibration device and calibration method of magnetic probe in TEM well[P].China Patent: No.2231480, 2016-09-07.

[11] 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所.地-井瞬变电磁(TEM)三分量校正软件 1.0[CP].软著登字第 0663591 号, 2013-12-26.

Institute of Geophysical and Geochemical exploration, Chinese Academy of Geology. Ground-well transient electromagnetic (TEM) Three-component correction Software 1.0 [CP]. Soft Login No. 0663591, 2013-12-26.

[12] Gao J,Zhao A B,Peng F,et al. Inversion of array induction logs and its application[J]. Petroleum Science,2007,4(3):31-45.

[13] Hughes N A,Ravenhurst W R.Three componet DHEM surveying at balcooma[J].Exploration Geophysics,1996,27:77-89.

[14] Annetts D. Inversion of surface and downhole electromagnetic data for a 3D earth [C]//22nd ASEG Geophysical Conference, Extended Abstracts, 2012:1-3.

[15] 万云霞,王言章,程德福. 感应式磁传感器标定磁场处理方法研究[J]. 传感技术学报,2013,26(4):520-524.

Wan Y X, Wang Y Z, Cheng D F. Research on the processing method of calibration magnetic field for inductive magnetic sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators,2013,26(4):520-524.

The development of three-component inductive magnetic field sensor
suitable for shallow water work

ZHAO Yi^{1,2}, CHEN Xiao-Dong^{1,2}, HUANG Yue^{1,2}, WANG Gang¹, LI Yong-Bo¹,
ZHAO Fu-Gang¹, WANG Shu-Min^{1,2}

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China; 2. Key Laboratory of Geophysical Electromagnetic Detection Technology, Ministry of Natural Resources, Langfang 065000, China)

Abstract: The induction magnetic field sensor is widely used in geophysical electromagnetic apparatus. Because of the physical principle, the noise level of the magnetic field sensor is proportional to its length and volume, the length is usually 800~1 400 mm, and the mass is 3~6 kg. In this study, a compact and flux concentrator was developed. The length is less than 240 mm, the diameter is 110 mm, and the mass is 3kg. Its length is approx. 30% of traditional AMT magnetic field sensors, the frequency band is from 0.1 Hz to 10 kHz, and the equivalent magnetic field noise level is 0.8 pT/√Hz at 1Hz. The three magnetic field sensors with the same parameters are mounted vertically to each other on a substrate to form a three-component inductive magnetic field sensor, its volume is 255 mm×255 mm×255 mm, and the mass is 10 kg. The inclination and azimuth angle are measured by installing the directional device, and the magnetic field data correction is carried out to realize the validity of the measurement data under any attitude. Effective operation is carried out in shallow water by installing a waterproof hood. Field experiments show that the three-component magnetic field sensor can be arranged on the ground, and can be arranged in the shallow water to carry out AMT work, which greatly improves the field construction efficiency and has a broad application prospects.

Key words: three-component; inductive magnetic field sensor; magnetic flux aggregation; attitude measurement; data correction