

刘凯, 米晓利, 朱万华等. 2014. 一种用于 TEM 高灵敏度感应式磁场传感器设计. 地球物理学报, 57(10): 3485-3492, doi: 10.6038/cjg20141034.

Liu K, Mi X L, Zhu W H, et al. 2014. A design of high sensitivity induction magnetometer for TEM. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(10): 3485-3492, doi: 10.6038/cjg20141034.

一种用于 TEM 高灵敏度感应式磁场传感器设计

刘凯^{1,3}, 米晓利², 朱万华^{1,3}, 闫彬^{1,3}, 刘雷松¹, 方广有¹

1 中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室, 北京 100190

2 中国石油集团东方地球物理公司, 河北涿州 072751

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 瞬变电磁法(TEM)作为地球物理非地震探勘主要电磁方法之一, 广泛应用于油气、矿产等地下资源探测. 本文分析 TEM 磁场传感器频率响应特点, 采用欠阻尼匹配拓展传感器线性响应频率范围; 分析磁传感器各类噪声源分布, 提出不同频段上影响磁传感器性能的主要因素. 最终研制一款高磁导率磁芯的 TEM 感应式磁场传感器, 工作频段为 10 mHz~1 kHz, 等效输入噪声水平为 $4\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$, $15\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}@200\text{Hz}$. 传感器直径为 50 mm, 长度 800 mm, 重量 3.2 kg, 相比现有 TEM 接收磁场传感器, 体积小、重量轻、工作频段低. 实验测试与生产作业表明: 最新研制的高灵敏度 TEM 磁场传感器更加适合大深度、3D 阵列电磁勘探.

关键词 瞬变电磁法; 感应式磁场传感器; 欠阻尼匹配; 噪声分析

doi: 10.6038/cjg20141034

中图分类号 P631

收稿日期 2014-05-06, 2014-08-18 收修定稿

A design of high sensitivity induction magnetometer for TEM

LIU Kai^{1,3}, MI Xiao-Li², ZHU Wan-Hua^{1,3}, YAN Bin^{1,3}, LIU Lei-Song¹, FANG Guang-You¹

1 Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 BGP, CNPC, Zhuozhou 072751, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Transient Electromagnetic Method (TEM), as a non-seismic geophysical exploration mainstream electromagnetic method, is widely used in oil, gas, mineral and other underground resources exploration areas. Under the analysis of the design for TEM induction magnetometer, this paper uses under-damped matching to expand the linear response frequency range of the magnetometer. Meanwhile, comparing the distribution of noise sources of the magnetometer, it shows the main noise factors which affect the magnetometer performance in different frequency bands. As a result, an induction magnetometer with a high permeability core has been designed, manufactured and tested. The working frequency is 10 mHz~1 kHz. The equivalent input noise level is $4\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$, $15\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}@200\text{Hz}$. This sensor is of 50 mm diameter, 800 mm length and 3.2 kg weight. Comparing to other magnetic receiving sensors for TEM, this has smaller size, lighter weight and lower operating frequency band. Laboratory and field tests show that this high sensitivity magnetometer for TEM is more suitable for large depth, 3D array of electromagnetic exploration.

基金项目 国家重大科研装备研制项目“深部资源探测核心装备研发”(ZDYZ2012-1)-03 子项目“航空瞬变电磁勘探仪”-04 课题“A TEM 吊舱与感应式矢量磁传感器技术研究”资助.

作者简介 刘凯, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事磁场传感器技术研究. E-mail: Casioliu@qq.com

Keywords Transient electromagnetic method (TEM); Induction magnetometer; Under-damped match; Noise analyzing

1 引言

瞬变电磁法(Transients Electromagnetic Method, TEM)起源于20世纪50—60年代,它利用接地电极或不接地回线向地下发射双极性脉冲电流,即为一次场,地下介质在其激发下的感应涡流产生随时间变化的二次场.在一次场的间歇期,使用接收线圈测量磁场信号,通过对二次场信号的提取和分析,从而达到探测地下地质体的目的(Nabighian et al., 1988),目前作为主要的非地震方法之一,广泛应用于油气、矿产等地下资源探测领域(Fitterman et al., 1986; Meju et al., 2002; 嵇艳鞠等, 2005; He et al., 2012).

目前主流 TEM 仪器包括加拿大 Geonics 公司 PROTEM 系列、Phoenix-Geophysics 公司 V8、澳大利亚 Monex GeoScope 公司 TerraTEM 和美国 Zonge 公司 GDP-32 等,前 3 家公司接收磁传感器均采用空心线圈方式实现,Geonics 公司 3D-3LF Coil 尺寸为 $60\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 20\text{ cm}$,重量为 16 kg,有效面积为 200 m^2 . 凤凰公司 TEM 接收线圈直径为 1.1 m,重量为 12 kg,有效面积为 100 m^2 . TerraTEM 接收线圈尺寸为 $70\text{ cm} \times 70\text{ cm} \times 25\text{ cm}$,重量为 9.5 kg,线圈部分有效面积为 125 m^2 . 由电磁感应原理可知频率越低线圈感应信号越弱,空心线圈为了达到 TEM 勘探需求的灵敏度,往往体积与重量偏高,不利于野外大规模施工作业. Zonge 公司 TEM/3 采用铁氧体磁芯结构,线圈部分有效面积为 300 m^2 ,直径 11 cm,长度 61 cm,重量 4.5 kg. 相对于空心线圈,TEM/3 体积和重量显著减小,但其线圈有效面积偏小,灵敏度偏低,仅仅能够用于地下中浅目标探测,对于深部油气资源领域,低频分辨率差,无法获取深部目标消息. 综上所述,现有 TEM 接收线圈由于重量、体积和灵敏度等原因,无法满足深部资源探测和三维电磁勘探新要求.

近年来,国内外有多篇感应式磁场传感器的研究成果发表(Lukoschus, 1979; Ripka, 2001; Tumanski, 2007; Yan, 2013),如 Séran 等(2005)设计制作星载三轴磁场传感器,重量为 430 g,噪声水平为 $10\text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{ Hz}$, $30\text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}@300\text{ Hz}$,工作频率范围为 $1\text{ Hz} \sim 20\text{ kHz}$. Grosz 等(2010, 2011)设计三轴磁场传感

器,尺寸为 $72\text{ mm} \times 69\text{ mm} \times 69\text{ mm}$,噪声水平为 $12\text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{ Hz}$,工作频率范围为 $20\text{ mHz} \sim 7\text{ Hz}$. 朱万华等(2013)研制基于磁通负反馈的高灵敏度磁场传感器,长度为 96 cm,重量 $\leq 6\text{ kg}$,噪声水平为 $1.5\text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}@0.1\text{ Hz}$, $0.15\text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{ Hz}$, $30\text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}@10\text{ Hz}$,工作频率范围为 $1\text{ mHz} \sim 1\text{ kHz}$. 这些研究成果可应用于空间磁场、磁异常探测和大地电磁测深等领域,但均为频率域磁场传感器,其响应曲线在频域上随频率非线性变化,无法满足时间域电磁方法勘探需求.

国内有多家单位开展 TEM 磁场传感器研究,如吉林大学、中国地质科学院—地球物理地球化学勘查研究所和浙江大学等. 吉林大学对 TEM 磁场传感器研究如 M-1 航电系统,钱镔(1982),衣汉权(1983)讨论接收线圈频率响应计算,并依据误差等值曲线,选定线圈合适谐振频率 4.5 kHz,匹配系数为 0.9;谭飞亚(2010)介绍 TEM 空心接收线圈部分理论,包括接收线圈频率响应,匹配方式,放大电路与线圈级联噪声分析;Chu 等(2012)设计等效接收面积 2000 m^2 ,谐振频率 34 kHz TEM 空心线圈,采用双层屏蔽来抑制外界噪声,采用欠阻尼匹配来扩展线性频率响应范围. 浙江大学王华军(2010)讨论线圈阻尼系数对瞬变接收线圈频率响应影响. 综上所述,国内学者对于 TEM 磁场传感器的设计还有一些不足:(1)普遍认为临界阻尼为最佳匹配状态(王华军, 2010; 王世隆等, 2011),也有学者提出或已经采用欠阻尼匹配方式拓展传感器线性频率响应范围,在实验中调整为欠阻尼匹配(钱镔, 1982; Chu et al., 2012),可对传感器线性频率响应特点缺乏理论分析,未能从理论上得到最优化匹配系数范围;(2)使用低噪声放大电路来降低传感器噪声(谭飞亚, 2010),未从线圈和电路作为整体考虑传感器噪声分布特点,采用噪声匹配方式提升传感器性能.

在国内外现有工作基础上,本文总结了 TEM 接收磁场传感器设计理论和方法. 首先,分析传感器归一化谐振频率和不同匹配系数状态下幅频与相频响应,数值分析其线性误差分布,得到幅度线性误差最小与相位误差最小对应的匹配系数范围(0.71~0.86),该方法可用于 TEM 磁场传感器线性频率响应设计;其次,分析传感器整体噪声模型,提出传感

器放大电路等效输入电压和电流噪声与线圈参数最佳噪声匹配状态,分析不同频段上传感器噪声性能主要决定因素,该方法可用于 TEM 磁场传感器噪声性能设计;最终,根据上述设计理论与方法,新研制的高磁导率磁芯 TEM 感应式磁场传感器,线圈部分有效面积为 1600 m^2 ,线性工作频段为 $10 \text{ mHz} \sim 1 \text{ kHz}$,等效输入噪声水平为 $4 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}} @ 1 \text{ Hz}$, $15 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}} @ 200 \text{ Hz}$,传感器直径 50 mm ,长度 800 mm ,重量 3.2 kg ,相比现有 TEM 接收磁场传感器,体积和重量更占优势、工作频段更低。并且,使用多支该磁场传感器进行了野外作业,测试结果表明:新研制的高灵敏度 TEM 磁场传感器更加适合大深度、3D 阵列电磁勘探,在我国深部资源勘探等领域具有良好应用前景。

2 TEM 感应式磁场传感器设计理论

2.1 TEM 磁场传感器频率响应设计

TEM 感应式磁场传感器内部主要分为两个部分,即接收线圈与放大电路,相比于接收线圈有限带宽,放大电路可以视为宽带恒定增益放大器。其等效电路模型如图 1 所示。

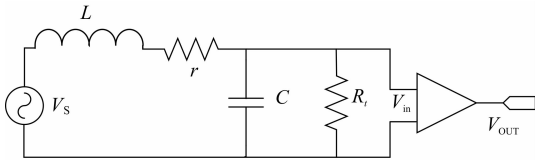


图 1 TEM 磁场传感器的等效电路图

Fig. 1 Equivalent electrical circuit of a magnetometer

其中 V_s 为线圈感应电压, L 为线圈等效电感, r 为线圈内阻, C 为线圈分布电容, R_t 为匹配电阻。频率域磁场传感器一般采用磁通负反馈(朱万华等, 2013)或者电流放大电路来抑制线圈谐振,拓展可用频带范围,这两种方法对于 TEM 磁场传感器并不适用。

基于法拉第电磁感应原理,传感器内部接收线圈感应电压为

$$V_s(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\mu_{\text{app}} NS \frac{dB}{dt}, \quad (1)$$

其中 N 为线圈匝数, Φ 为线圈内磁通量, μ_{app} 为磁芯有效磁导率, S 为磁芯截面积。 B 为磁芯轴向方向磁场分量。

在频率域,线圈感应电压为

$$V_s(\omega) = -j\omega\mu_{\text{app}}NSB, \quad (2)$$

由式(1)可知时域上线圈感应电压正比于磁场的变化率,由式(2)可知频率域上线圈感应电压随频率线性增加。而实际上由于线圈本身参数,特别是线圈谐振频率影响,线圈输出信号在临近谐振频率时发生畸变,并联匹配阻抗可以抑制线圈谐振,扩展线圈频率线性响应范围,匹配阻抗阻值与线圈参数有关,本节主要依据线圈等效电路模型,分析线圈的频率响应特点,寻找最优化匹配系数范围。

由图 1 可知,线圈感应信号经过线圈与匹配阻抗网络,通过放大电路放大,最终作为传感器输出,已假设放大电路为宽带恒定增益放大器,因此在放大器输入端信号为

$$V_{\text{in}} = \frac{R_t}{r + R_t - \omega^2 R_t LC + j\omega(L + rR_t C)} \cdot V_s, \quad (3)$$

线圈等效电路为 LC 二阶网络,由式(3)可得线圈网络传递函数为

$$H(\omega) = \frac{R_t}{r + R_t - \omega^2 R_t LC + j\omega(L + rR_t C)}. \quad (4)$$

由式(3)可知,线圈实际输出电压信号 V_{in} ,是原始磁场感应信号 V_s 经过线圈等效二阶网络 $H(\omega)$ 后输出。

从信号无失真角度考虑,要求二阶网络满足线性时不变系统要求(Oppenheim et al, 1996),由此可得线圈传递函数形式应为

$$H(\omega) = A \cdot e^{-j\omega t_0}, \quad (5)$$

其中 A 与 t_0 为常数,即线圈频率响应幅度为不随频率变化常数,相位随频率线性下降。

参照式(5),线圈等效网络传递函数式(4)可分为幅频与相频响应:

$$A(\omega) = \alpha \frac{\omega_n^2}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\xi\omega_n\omega)^2}}, \quad (6)$$

$$\phi(\omega) = -\arctg \frac{2\xi\omega_n\omega}{\omega_n^2 - \omega^2}, \quad (7)$$

其中, α 为直流衰减系数,一般情况下 $R_t \gg r$,不妨认为 $\alpha \approx 1$, ξ 为线圈匹配系数, ω_n 为无阻尼自然衰减频率。其与线圈等效参数关系为

$$\alpha = \frac{R_t}{R_t + r}, \quad (8)$$

$$\xi = \frac{L + rR_t C}{2\sqrt{(r + R_t)R_t LC}}, \quad (9)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{r + R_t}{R_t LC}}, \quad (10)$$

由式(6)和式(7)可知,当 $\omega \rightarrow 0$ 时:

$$A(\omega)_{\omega \rightarrow 0} = \alpha, \quad (11)$$

$$\phi(\omega)_{\omega \rightarrow 0} = -\frac{2\xi}{\omega_n} \omega. \quad (12)$$

此时式(11)和式(12)满足线性时不变传递函数的条件式(5),即在频率低时线圈传递函数满足线性时不变要求,此时原始感应信号无失真传输,当频率增加时,线圈传递函数逐渐偏离此线性响应范围,此时原始感应信号发生畸变,因此分别以传递函数幅度和相位与线性时不变响应差值作为线性误差量化函数:

$$E_a(\omega) = \frac{A(\omega) - \alpha}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} - 1, \quad (13)$$

$$E_\phi(\omega) = \phi(\omega) - \left(-\frac{2\xi}{\omega_n} \omega\right) = \arctg\left[\frac{2\xi \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}\right] - 2\xi \frac{\omega}{\omega_n}, \quad (14)$$

其中, E_a 为幅度偏差,已对直流衰减常数归一化, E_ϕ 为相位偏差,传递函数相位随频率下降,未归一化.由式(13)和式(14)可知,线圈传递函数误差曲线只与其归一化频率 ω/ω_n 和匹配系数 ξ 有关,其分布趋势如图 2 所示.

图 2 中,匹配系数选取范围为 0.5~1.2,归一化谐振频率范围为 0~1.由图 2 可知,幅度与相位无误差曲线起始于不同匹配系数,分别为 0.71 与 0.86,且随频率增加零误差曲线所对应匹配系数呈下降趋势,即不存在某个固定匹配系数能同时保证幅度与相位线性误差为零,也不存在某个固定的匹配系数使得全频率范围内误差恒定,且由曲线的密集程度变化可知,当频率接近传感器线圈无阻尼自

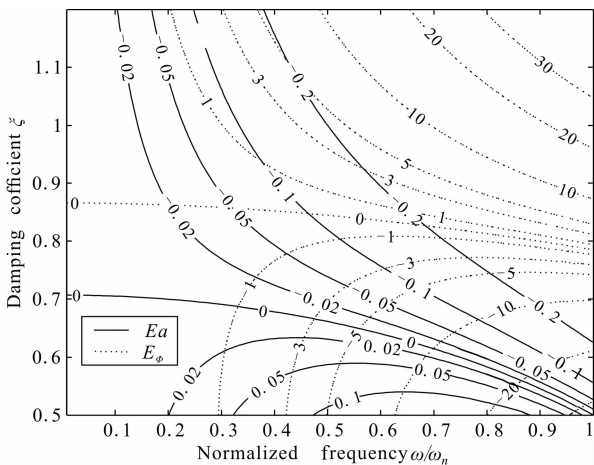


图 2 线圈传递函数误差曲线图

Fig. 2 Amplitude (solid line) and phase (dotted line) error of magnetometer transfer function

然衰减频率 ω_n 时,线性误差迅速扩大.整体考虑最合适的匹配系数范围,当 TEM 磁场传感器匹配系数选择为 0.71~0.86 范围内时,相比于临界阻尼匹配,即 $\xi=1$,在整个频带内能同时保证幅度与相位线性误差最小,降低了接收线圈非线性误差,即在不改变线圈参数的条件下,采用欠阻尼匹配(0.71~0.86)相比于临界阻尼匹配有效拓展了线性频率范围.匹配系数为 0.71 时为幅度线性误差最小,匹配系数为 0.86 时相位线性误差最小.

瞬变接收线圈的匹配状态影响了其线性工作频率范围,对于同样线圈采用不同匹配方式可能会获得截然不同结果,本节详细分析了线圈传递函数对于线圈感应信号影响,从线性时不变系统角度,定量分析了线圈不同匹配系数下线性误差,指出了相位和幅度误差最小对应匹配系数范围,可以用于 TEM 磁场传感器设计.

张爽等(2014)同样提出了欠阻尼最佳匹配方式,最佳匹配范围为 0.8~0.9,这与文中匹配系数为 0.86 时相位线性误差最小的结论不谋而合.且由下文国外商用 TEM 磁场传感器测试结果可知,国外商用 TEM 磁场传感器已经使用欠阻尼作为传感器的匹配方式,其匹配系数满足 0.71~0.86 的最佳匹配系数范围.

2.2 TEM 磁场传感器噪声分析

TEM 磁场传感器噪声水平决定了其探测性能,是 TEM 磁场传感器的关键性能参数之一,其内部等效噪声源分布如图 3 所示,TEM 磁场传感器主要噪声来源为放大电路等效输入电压噪声 e_v 、等效输入电流噪声 e_i 、线圈内阻热噪声 e_r 和匹配电阻热噪声 e_{R_t} ,如图 3 所示.

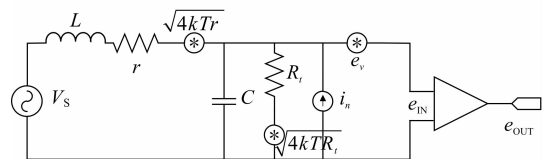


图 3 TEM 磁场传感器噪声模型

Fig. 3 Equivalent circuit of magnetometer with noise sources

由图 3 可知,在放大电路输入端,各个噪声源贡献分别为

$$e_r(\omega) = \sqrt{4kT r} |H(\omega)|, \quad (15)$$

$$e_{R_t}(\omega) = \sqrt{\frac{4kT}{R_t}} |j\omega L + r| |H(\omega)|, \quad (16)$$

$$e_i(\omega) = |i_n| |j\omega L + r| |H(\omega)|, \quad (17)$$

$$e_v(\omega) = e_v, \quad (18)$$

其中 k 表示玻耳兹曼常数, T 表示电路工作时的开尔文温度. 由此可得 TEM 磁场传感器放大电路输入端总噪声为

$$e_{\text{IN}}(\omega) = \sqrt{e_r^2 + e_{R_c}^2 + e_v^2 + e_i^2}, \quad (19)$$

由式(2)一式(4)和式(19)可得 TEM 磁场传感器等效输入磁场噪声水平为

$$S_i = \frac{e_{\text{IN}}(\omega)}{\omega \mu_{\text{app}} NS \cdot |H(\omega)|}. \quad (20)$$

由于选择合适匹配系数使线圈线性误差最小,不妨假设在谐振频率范围内, $|H(\omega)| \approx 1$. 由式(15)一式(18)可知,线圈热噪声 e_r 和电路输入电压噪声 e_v 不随频率变化. 当频率低时, $|j\omega L| \ll r$, 此时匹配阻抗噪声 e_{R_c} 和电路电流噪声 e_i 为固定值, 由于线圈内阻一般较小, 此时远小于 e_r 和 e_v , 当频率上升时, $|j\omega L| \gg r$, 此时 e_{R_c} 和 e_i 随频率线性上升, 最终超过 e_v 和 e_r , 成为主要的噪声来源. 因此, 按频率范围划分, 输入噪声来源主要为两部分, 在低频段, 主要噪声源为放大电路输入电压噪声 e_v 和线圈热噪声 e_r , 在高频段, 为放大电路电流噪声 e_i 和匹配阻抗噪声 e_{R_c} .

由以上讨论可知, 在每个频段内主要噪声源都可以分为线圈与电路两部分组成, 因此要降低传感器整体噪声需要联合考虑线圈参数与放大电路的参数. 应用于 TEM 磁场传感器的放大电路, 通过式(15)一式(18)可知, 在噪声匹配条件下, 电路噪声参数应为

$$e_v = \sqrt{4kTr}, \quad (21)$$

$$i_n = \sqrt{\frac{4kT}{R_i}}. \quad (22)$$

实际上(21)与式(22)很难同时满足, 新研制的 TEM 磁场传感器的线圈内阻为 1.2 k Ω , 匹配阻抗为 700 k Ω 时, 需要对应的放大电路的电压噪声为 4.5 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, 电流噪声为 0.15 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$. 目前集成放大芯片很难保证电压与电流噪声同时满足此要求, 比如常用 LT1028 电压噪声为 1 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @10 Hz, 电流噪声为 1.0 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @1 kHz, 电流噪声偏高.

进一步计算 TEM 磁场传感器等效输入磁场噪声水平, 依据有磁芯线圈电感经验公式(Lukoschus et al., 1979)

$$L = N^2 \cdot \frac{\mu_0 \mu_{\text{app}} S}{l} \cdot \left(\frac{l_w}{l}\right)^{-2/5}, \quad (23)$$

将式(23)代入式(20), 则不同频段传感器的等效输入噪声水平为

$$S_{i(\text{LF})} = \frac{e_{\text{IN}(\text{LF})}}{\omega \mu_{\text{app}} NS} = \frac{\sqrt{4kTr + e_v^2}}{\omega \mu_{\text{app}} NS}, \quad (24)$$

$$S_{i(\text{HF})} = \frac{e_{\text{IN}(\text{HF})}}{\omega \mu_{\text{app}} NS} = \sqrt{\frac{4kT}{R_i} + i_n^2} \cdot \mu_0 \cdot \frac{N}{l} \cdot \left(\frac{l_w}{l}\right)^{-2/5}, \quad (25)$$

由式(24)和式(25)可知, 传感器的等效输入噪声水平在低频段随着频率线性下降, 在高频段为不随频率变化的常数.

TEM 磁场传感器噪声水平影响其测深能力, 分析传感器各个噪声来源, 针对优化设计线圈与电路参数, 能够取得良好效果. 式(24)和式(25)是对于有磁芯线圈等效输入磁场噪声水平, 不适用于空心接收线圈, 但噪声源在不同频段的分布特点不变, 同样可以用于指导空心线圈的电路与线圈的匹配设计.

3 TEM 磁场传感器测试

在上述设计理论指导下, 采用高磁导率磁芯线圈结构, 磁芯长度为 15 mm \times 15 mm \times 600 mm, 线圈分为 12 节, 每节 2000 圈, 总匝数为 24000 圈, 线圈部分内阻为 1.2 k Ω , 电感为 103 H, 有效面积约为 1600 m², 工作频率范围为 10 mHz \sim 1 kHz. 放大电路使用 INA115 仪表放大电路, 其电压噪声为 15 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, 电流噪声为 0.2 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @1 kHz. 传感器谐振频率为 1.6 kHz, 匹配阻抗为 700 k Ω , 按式(21)与式(22)计算, 电路电压噪声偏高, 电流噪声符合设计要求. 最终完成的 TEM 传感器整体直径 50 mm, 长度 800 mm, 重量 3.2 kg.

目前国内外商用化 TEM 磁场传感器灵敏度带宽以及噪声水平各不相同, 本次 TEM 磁场传感器对比测试传感器为应用较为广泛的 Geonics 公司 3D-3LF Coil、Zonge 公司 TEM/3 和 Monex GeoScope 公司的 TRC-1. CAS-50(即新研制的 TEM 磁场传感器)与 TEM/3 使用 Pulz(2002)制作标定系统, 标定线圈直径 38 cm, 长度 4.5 m, 在标定线圈中心区域直径 10 cm, 长度 2.5 m 范围能保证 0.1% 均匀度, 工作频率范围为 0.01 Hz \sim 100 kHz. 由于 3D-3LF Coil 与 TRC-1 尺寸(60 cm \times 60 cm \times 20 cm 和 70 cm \times 70 cm \times 25 cm)限制, 使用 Serviciencia, S. L. (2013)公司三轴 Helmholtz 标定线圈, 3D-3LF Coil 为三轴线圈, 其三个方向灵敏度与带宽相同, 因而只展示 Z 方向测试结果. 由于标定频率越低耗费时间越长, 且频率趋近零时, 传感器频率响应线性度良好, 因而实际标定起始频率为 1 Hz, 截止频率超

过传感器本身谐振频率。

由图 4 与表 1 可知,国外商用 TEM 磁场传感器基本为欠阻尼匹配,为 0.71~0.86 区间内,只有 TRC-1 为临界阻尼匹配;国外商用 TEM 磁场传感器接收面积(即灵敏度)偏小,谐振频率都大于 10 kHz,适用于频率较高的应用场合。

表 1 CAS-50 与国外商用 TEM 磁场传感器参数对比

Table 1 The Parameters of CAS-50 and Commercial TEM Magnetometers

Name	Damping Coefficient ξ	Receiving Area/m ²	Resonance Frequency/kHz
CAS-50	0.74	25380	1.58
TEM/3	0.75	10470	14.4
TRC-1	1.00	1176	12.9
3D-3LF(Z)	0.80	196.3	30.3

磁场传感器噪声水平测试环境为磁屏蔽室,屏蔽室内部磁场水平远低于磁场传感器等效输入磁场噪声水平,可以用于检测 TEM 磁场传感器噪声水平。考虑 TEM 磁场传感器内部电路增益较小,输出噪声水平低,使用低噪声放大器 SR560,设定增益 100 放大 TEM 磁场传感器输出信号。测量仪器为动态信号分析仪 Agilent 35670A,动态信号分析仪测量传感器在磁屏蔽室内输出电压噪声,除以 SR560 增益和传感器灵敏度可得其等效输入磁场噪声水平。

TEM 传感器噪声测试结果如图 5,对比频率范围为 0.1 Hz~1 kHz。在整个频率范围内,新研制的 TEM 磁场传感器优于国外商用产品,在 10 Hz 处,国外商用产品中 TEM/3 噪声水平最低约为 $0.5 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$,其次为 3D-3LF,约为 $2 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$,最后为 TRC-1,约为 $3.5 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。而新研制的磁场传感器噪声水平仅为 $0.2 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。当频率低于 1 Hz 时,由于 $1/f$ 噪声和传感器灵敏度的下降,TEM 磁场传感器的噪声水平上升,TEM/3 的噪声水平上升最快,3D-3LF 与 TRC-1 噪声水平相近。在 1 Hz 处,TEM/3,3D-3LF,TRC-1 噪声水平最低为 $50 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$,而新研制的磁场传感器仅为 $4 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。在 0.1 Hz 处,国外商用 TEM 磁场传感器噪声水平大于 $2 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$,新研制的磁场传感器为 $100 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$,远低于国外商用 TEM 磁场传感器噪声水平。

由图 5 可知,新研制的磁场传感器噪声水平:0.1 Hz 时为 $100 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$,1 Hz 时为 $4 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$,10 Hz 时为 $0.2 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$,大于 200 Hz 时为 $15 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

TEM 磁场传感器灵敏度与噪声水平对比测试表明:新研制的 TEM 磁场传感器工作频率低(10 mHz~1 kHz),在低频灵敏度高(有效面积约为 25000 m^2),使用欠阻尼匹配使其在工作频率范围内能保证良好线性响应;在 1 kHz 以下频率范围,新研制 TEM 磁场传感器噪声水平低于国外商用 TEM 磁场传感器,在 1 Hz 以下噪声水平仅为国外商用 TEM 磁场传感器的十分之一,更加适合低频 TEM 勘探应用。

4 野外试验测试

2013 年,使用研制的磁场传感器在准噶尔盆地 MH 地区成功进行了生产应用。

MH 地区近几年油气资源取得了重大突破,为加快该区勘探步伐,油田公司在该区部署了时频电磁勘探工作,目的是进一步查清含油砂体分布范围,辅助地震进行有利储层预测,提高油气预测可靠性,为该区下一步油气勘探部署提供依据。

图 6 是采用新研制 TEM 磁场传感器进行数据采集、通过专业软件处理反演得到深度剖面,剖面从电性上清楚地刻画了勘探区地层结构,并与过剖面的几口钻井电阻率测井曲线揭示的电性变化特征一致,证明新研制 TEM 磁场传感器可靠性。

5 总结

5.1 本文详细分析了 TEM 感应式磁场传感器设计方法,针对其频率响应要求线性,在接收线圈等效模型基础上详细分析了匹配系数对于接收线圈频率响应线性误差影响,指出了幅度与相位线性误差最小匹配系数范围 0.71~0.86;针对接收线圈噪声性能要求,分析了接收线圈各个噪声源对总输入噪声贡献,指出了在不同频率范围主要噪声源,提出了接收线圈部分与放大电路部分噪声性能相匹配,有助于实现与接收线圈噪声匹配的低噪声放大电路设计。新研制了一款具有高磁导率磁芯的 TEM 感应式磁场传感器,工作频带 10 mHz~1 kHz,等效输入噪声水平为 $4 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1 \text{ Hz}$, $15 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}@200 \text{ Hz}$,尺寸为直径 50 mm,长度 800 mm,重量 3.2 kg,相比于现有的 TEM 磁场传感器,体积、重量和噪声水平都有优势。并且由于其工作频率很低,更加适合大深度、3D 阵列电磁勘探。

5.2 大功率瞬变电磁方法是深部油气资源勘探的

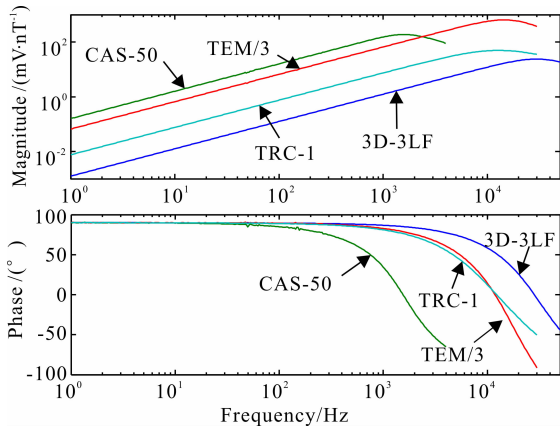


图 4 实测磁场传感器灵敏度曲线

Fig. 4 Measured frequency response of magnetometers

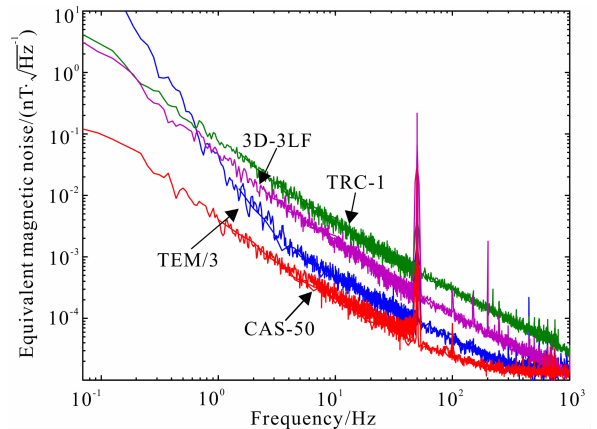


图 5 磁场传感器等效输入噪声曲线

Fig. 5 Measured equivalent input magnetic noise of magnetometers

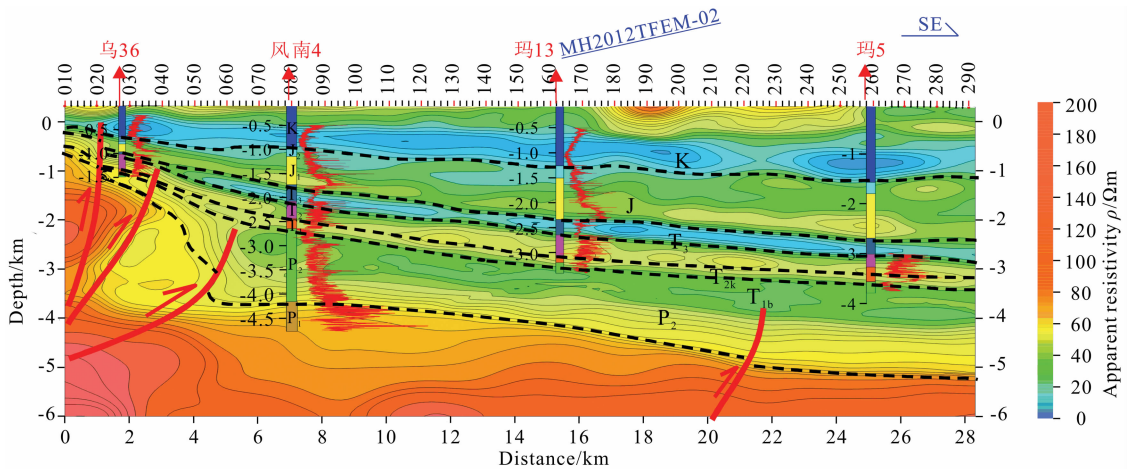


图 6 MH 地区电阻率二维深度剖面

Fig. 6 Apparent resistivity-depth profile in MH area

重要地球物理方法之一,用于该方法的高灵敏度磁场传感器一直是限制我国电磁勘探装备国产化的瓶颈技术,本文实现了自主研制的高灵敏度磁场传感器用于野外大规模的生产作业,这对我国地球物理装备研发具有重要意义。

5.3 由于电子电路中低频(10 Hz 以下)存在 $1/f$ 噪声,将对磁场传感器低频性能产生负面影响,如理论设计 TEM 磁场传感器在 1 Hz 噪声水平为 $2.5 \text{ pT}\sqrt{\text{Hz}}$,实际却为 $4 \text{ pT}\sqrt{\text{Hz}}$,0.1 Hz 的噪声水平应为 $25 \text{ pT}\sqrt{\text{Hz}}$,实际测试为 $100 \text{ pT}\sqrt{\text{Hz}}$,如何降低 $1/f$ 噪声对于 TEM 磁场传感器的影响将是下一步研究方向。

致谢 感谢中国石油东方地球物理公司何展翔教授级高工在磁场传感器野外测试及数据处理提供支持。

References

Fitterman, D. and Stewart, M. 1986. Transient electromagnetic

sounding for groundwater. *Geophysics*, 51(4): 995-1005. doi: 10.1190/1.1442158.

Grosz A, Paperno E, Amrusi S, et al. 2010. Integration of the electronics and batteries inside the hollow core of a search coil. *Journal of Applied Physics*, 107(9), 09E703.

Grosz A, Paperno E, Amrusi S, et al. 2011. A three-axial search coil magnetometer optimized for small size, low power, and low frequencies. *Sensors Journal, IEEE*, 11(4): 1088-1094.

He Z X, Zhao Z, Liu H Y, et al. 2012. TFEM for oil detection: Case studies. *The Leading Edge*, 31(5): 518-521. doi: 10.1190/tle31050518.1.

Ji Y J, Lin J, Zhu K G, et al. 2005. Underground water prospecting by transient electromagnetic method. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 20(3): 828-833.

Lukoschus D G. 1979. Optimization theory for induction-coil magnetometers at higher frequencies. *Geoscience Electronics, IEEE Transactions on*, 17(3): 56-63.

Meju M A. 2002. Geoelectromagnetic exploration for natural resources: models, case studies and challenges. *Surveys in Geophysics*, 23(2-3): 133-206.

Nabighian M N, et al. 1988. Electromagnetic methods in applied

- geophysics-Theory Volume I. Society of Exploration Geophysicists, 1988. 313-503.
- Oppenheim A V, Willsky A S, Nawab S H. 1996, Signals & systems. 1996. Chapter 6.
- Pulz E. 2002. A calibration facility for search coil magnetometers. *Measurement Science and Technology*, 13(5): N49.
- Qian Bin. 1982. Time-domain analysis and parameter selection receiving coil of the M-1 AEM system. *Journal of Changchun Geological College* (in Chinese), 2:129-144.
- Ripka, P. 2001. Magnetic sensors and magnetometers (Vol. 8). Norwood: Artech house.
- Séran H C, Fergeau P. 2005. An optimized low-frequency three-axis search coil magnetometer for space research. *Review of scientific instruments*, 76(4): 044502-044502-10.
- Serviciencia, S. L. 2013. 1D, 2D and 3D Helmholtz Coils. [Online]. Available: <http://www.serviciencia.es/Helm-i-1.htm>
- Tan Feiya. 2008. Development of TEM receiver coil [Master's thesis] (in Chinese). Changchun: Jilin University.
- Tumanski S. 2007. Induction coil sensors—A review. *Measurement Science and Technology*, 18(3): R31-R46.
- Wang H J. 2010. Characteristics of damping coefficient effect on transient electromagnetic signal. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 53(2):428-434.
- Wang S L, Wang Y Z, Sui Y Y, et al. 2011, A bird calibration device of Helicopter-borne TEM with concentric bucking loop. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 54(9): 2397-2406, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.023.
- Xingyu C, Shuang Z, Shudong C. 2012. An Optimal Transfer Characteristic of an Air Cored Transient Electromagnetic Sensor. Industrial Control and Electronics Engineering (ICICEE), 2012 International Conference on. IEEE, 482-485.
- Yan B, Zhu W H, Liu L S, et al. 2013. An optimization method for Induction Magnetometer of 0.1 mHz to 1 kHz. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 49(10): 5294-5300.
- Yi Hanquan. 1983. Parameter selection for the receiving coil of the M-1 pulse type AEM system. *Journal of Changchun Geological College* (in Chinese), 1:123-134.
- Zhang S, Liu Z X, Chen S D. 2014. Calibration study on the damping characteristics of TEM sensor. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(2): 662-670, doi: 10.6038/cjg20140229.
- Zhu W H, DI Q Y, Liu L S, et al. Development of search coil magnetometer based on magnetic flux negative feedback structure. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(11): 3683-3689, doi: 10.6038/cjg20131109.

附中文参考文献

- 嵇艳鞠, 林君, 朱凯光等. 2005. 利用瞬变电磁技术进行地下水资源勘察. *地球物理学进展*, 20(3), 828-833.
- 钱镛. 1982. M-1 航电系统接收线圈的时域分析和参数选择. *长春地质学院学报*, 2:129-144.
- 谭飞亚. 2008. TEM 接收线圈的研制[硕士学位论文]. 长春: 吉林大学.
- 王华军. 2010. 阻尼系数对瞬变电磁观测信号的影响特征. *地球物理学报*, 53(2):428~434
- 王世隆, 王言章, 随阳轶等. 2011. 同心补偿式直升机时间域航空电磁法吊舱校准装置研究. *地球物理学报*, 54(9): 2397-2406, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.023
- 衣汉权. 1983. M-1 型脉冲式航电仪接收线圈参数的选择. *长春地质学报*, 1983, 1:123-134
- 张爽, 刘紫秀, 陈曙东. 2014. 瞬变电磁传感器阻尼特性的标定研究. *地球物理学报*, 57(2): 662-670, doi:10.6038/cjg20140229.
- 朱万华, 底青云, 刘雷松等. 2013. 基于磁通负反馈结构的高灵敏度感应式磁场传感器研制. *地球物理学报*, 56(11): 3683-3689, doi: 10.6038/cjg20131109.

(本文编辑 刘少华)