

直升机航空瞬变电磁 Occam 反演及软件实现*

郭睿^{1,2} 武欣¹ 肖攀^{1,2} 方广有¹

(1. 中国科学院电子学研究所电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 直升机航空瞬变电磁系统对于地形复杂、环境恶劣地区的资源勘探具有十分重要的意义。由于航空瞬变电磁系统空间采样密集,数据量很大,在工程实践中普遍采用一维反演进行数据解释。研究了以圆形回线为模型的直升机航空瞬变电磁 Occam 反演算法,详细推导了圆形回线正演函数的雅可比矩阵的解析解,比用数值差分计算的雅可比矩阵有更高的反演精度。为适用于野外实验,基于直升机航空瞬变电磁系统用 C++ 语言开发了具有自主知识产权的一维 Occam 反演软件,该软件能实现坐标选取、数据预处理和反演等功能。将该软件应用实测数据的反演中取得了较好的效果。

关键词: 直升机航空瞬变电磁;圆形回线;正演;反演;雅可比矩阵;软件开发

中图分类号: TP312 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Helicopter transient electromagnetic occam inversion
and software developmentGuo Rui^{1,2} Wu Xin¹ Xiao Pan^{1,2} Fang Guangyou¹(1. Key Laboratory of Radiation and Detection Technology, Institute of Electronics, Chinese Academic of Sciences, Beijing 100190, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Helicopter transient electromagnetic system (HTEM) is an important tool for geophysical prospecting and detection in complex and harsh environment. The spatial sampling is dense and there is large amount of data to be interpreted. Taken the consideration of computing time, 1D inversion is mostly used in practical. This paper focuses on the HTEM system fixed with large circular transmitting loop, and develops Occam inversion for such system. In order to improve the computation accuracy, this paper derives Jacobian's matrix in analytic way. A software for HTEM's Occam inversion is developed to cater to the needs in field test. It can achieve data pre-processing and data inversion after selecting the receiver point. This software has a satisfying result when applied to the field data inversion.

Keywords: helicopter transient electromagnetic method; circular loop; forward modeling; inversion; Jacobian matrix; software development

0 引言

瞬变电磁法(transient electromagnetic method, TEM)是地球物理勘察中的重要手段,广泛应用于矿产资源勘查、水文、能源、考古探测以及未爆物探测等领域^[1-5],相较于传统的磁法探测^[6-7],具有适用范围广的特点。TEM使用回线源或接地导线源发射脉冲电流,从而在大地内部激励形成涡旋电流,通过观测涡旋电流衰减过程产生的二次磁场,实现对地下目标的探测^[8-9]。航空瞬变电磁系统将传统地面瞬变电磁系统搭载于飞行平台上,可用于沙漠、地表植被等地区的靶区圈定与快速评价,也可用于大面积的资源普

查^[8]。自20世纪80年代后,主流的航空瞬变电磁系统均采用固定翼模式^[10]。固定翼系统发射磁矩大,工作效率高,但也有足迹点较大、地形适应能力差等缺陷。2000年以来,全球出现了多套直升机瞬变电磁系统相比于固定翼航空瞬变电磁系统^[11],直升机航空瞬变电磁系统具有低空低速的特点,可以获得更高的空间分辨率,并对复杂地形具有更好的适应性。

航空瞬变电磁的高维反演是当前的研究热点和未来的发展方向,但目前由于其建模不精确、需要内存大、计算速度慢等缺点,航空瞬变电磁的高维反演技术仍不成熟,在实际工程中应用较少^[10]。目前在实地测量中一般采用一维

收稿日期:2017-03

* 基金项目:国家重点科研装备研制项目(ZDYZ2012-1)资助

反演方法。罗勇研究了航空 TEM 一维阻尼特征参数反演方法^[11]；李永兴等人^[12]研究了交替调整反演方法；此外，还可以使用经典的一维反演方法 Marquardt 法。以上 3 种方法直接基于最小二乘法进行数据拟合，当初始模型与真实模型相差较大时，迭代容易陷入局部极小值^[13]，反演效果较差。1987 年 Consable 提出了 Occam 反演，并由强建科等运用到固定翼航空瞬变电磁的数据反演中^[14]，该方法施加了电阻率纵向平滑约束，迭代过程稳定。除此之外，还可用神经网络^[15]、遗传算法^[16]等进行目标识别。

根据固定翼航空瞬变电磁系统的系统设计，其正演采用偶极-偶极模型，即假设发射源和接收线圈都为垂直磁偶极子；直升机航空瞬变电磁系统采用软支架，将圆形大回线拖吊至直升机下方，接收线圈置于圆形大回线中央，需采用圆形回线模型。本文从圆形回线模型的正演公式出发，详细推导了 Occam 反演时用到的雅克比矩阵的解析解，对提高反演精度具有较大的意义。直升机航空瞬变电磁的反演软件是工程实践中的重要方面，而利用数学仿真软件进行图形界面开发显然无法满足工程中对计算速度的需求。本文从实际应用出发，自主开发了基于 Visual Studio2015 平台的 C++ 软件界面，该软件能实现文件读取、简单的数据预处理和反演保存等功能，对野外数据的快速解释有很大的应用价值。

1 正演

建立 N 层大地模型，每层电阻率为 ρ_i ，每层厚度为 d_i 。设圆形发射回线的半径为 a ，电流为 I ，发射、接收线圈距地面高度为 H ，则接收线圈处接收的垂直磁场为^[1]：

$$H^z = \frac{Ia}{2} \int_0^\infty \lambda(1 + r_{TE} e^{-2u_i H}) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (1)$$

r_{TE} 称作反射系数，可写为：

$$r_{TE} = \frac{\lambda - \hat{u}_1}{\lambda + \hat{u}_1} \quad (2)$$

其中：

$$\hat{u}_1 = u_1 \frac{\hat{u}_2 + u_1 \tanh(-2u_1 d_1)}{u_1 + u_2 \tanh(-2u_1 d_1)} \quad (3)$$

$$\hat{u}_i = u_i \frac{\hat{u}_{i+1} + u_i \tanh(-2u_i d_i)}{u_i + \hat{u}_{i+1} \tanh(-2u_i d_i)} \quad (4)$$

$$\hat{u}_N = u_N \quad (5)$$

$$u_i = \sqrt{\lambda^2 + i\omega\mu\sigma_i}, \sigma_i = \frac{1}{\rho_i} \quad (6)$$

经过 Hankel 变换和 GS 变换^[17]后，即可得到圆形回线的二次场响应表达式。

2 反演

2.1 Occam 反演原理

对于一维层状大地模型，理论响应 \mathbf{d} 可通过正演函数 F 求得：

$$\mathbf{d} = F(\mathbf{m}) \quad (7)$$

式中： \mathbf{m} 为待反演的参数，在此可表示为电阻率。若观测响应值为 \mathbf{d}_{obs} ，则理论响应与观测值之间的不匹配程度可表示为

$$P_1 = \|\mathbf{W}_d(\mathbf{d} - \mathbf{d}_{obs})\|_2^2 \quad (8)$$

式中： \mathbf{W}_d 为数据的权值矩阵，若时间测道有 L 条，各时间测道误差为 σ_i ，则 $\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_L]^T$ ， $\mathbf{W}_d = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_L)$ 。 $\|\dots\|_2$ 为定义在数据空间上的二范数。

将大地进行 N 层剖分，第 i 层厚度为 d_i 且 $d_i/d_{i+1} < 1$ ，电阻率为 ρ_i ，假设大地电阻率纵向平缓变化，则电阻率约束为：

$$P_2 = \|\partial\mathbf{m}\|_2^2 \quad (9)$$

将 P_1 、 P_2 构成无约束的反演目标函数，并用参数 λ 描述模型约束强度，可得：

$$P = P_1 + \lambda P_2 = \|\mathbf{W}_d(\mathbf{d} - \mathbf{d}_{obs})\|_2^2 + \lambda \|\partial\mathbf{m}\|_2^2 \quad (10)$$

将正演函数线性化，可将模型 \mathbf{m}_1 的正演响应近似写为：

$$F(\mathbf{m}_1) = F(\mathbf{m}_0) + \mathbf{J}_0(\mathbf{m}_1 - \mathbf{m}_0) \quad (11)$$

式中： \mathbf{J}_0 为正演函数在模型 \mathbf{m}_0 处的偏导数矩阵，称其为雅克比矩阵，矩阵中单个元素为：

$$J_{0ij} = \frac{\partial F_i(\mathbf{m}_0)}{\partial m_j} \quad (12)$$

将目标函数写为：

$$P = \|\mathbf{W}_d(F(\mathbf{m}_0) + \mathbf{J}_0\mathbf{m}_1 - \mathbf{J}_0\mathbf{m}_0 - \mathbf{d}_{obs})\|_2^2 + \lambda \|\partial\mathbf{m}\|_2^2 \quad (13)$$

其中：

$$\partial = \begin{bmatrix} 0 & & & & 0 \\ -1 & 1 & & & \\ & -1 & 1 & & 0 \\ & & \dots & & \\ & & & & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (14)$$

令：

$$\nabla_{\mathbf{m}_1} P = 0 \quad (15)$$

得：

$$\mathbf{m}_1 = [(\mathbf{W}_d\mathbf{J}_0)^T(\mathbf{W}_d\mathbf{J}_0) + \alpha\partial^T\partial]^{-1} \cdot \mathbf{W}_d[\mathbf{d}_{obs} - F(\mathbf{m}_0) + \mathbf{J}_0\mathbf{m}_0] \quad (16)$$

计算当前拟合差：

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{n=1}^L \left(\frac{F(\mathbf{m}_1) - \mathbf{d}_{obs}}{\mathbf{d}_{obs}} \right)^2} \quad (17)$$

若拟合差大于反演期望值，将本次迭代产生的模型作为下次迭代的初始模型重复迭代，直到 RMS 小于期望值或达到最大迭代次数，迭代终止。

2.2 雅克比矩阵的解析解

在式(11)中用到了正演函数对电阻率的偏导数矩阵，该偏导数矩阵可以通过计算模型与其微小偏移量的响应之差进行数值近似。但由于多次进行迭代，每步积累的近似误差会对反演的拟合精度造成干扰。目前文献中尚未出现圆形回线瞬变电磁响应雅克比矩阵的解析形式，有必要对

其进行推导。

先对积分核函数进行求导,记核函数:

$$F = \frac{\lambda}{2} \left(1 + \frac{\lambda - \hat{u}_1}{\lambda + \hat{u}_1} e^{-2u_1 H} \right) \quad (18)$$

根据链式求导法则,有:

$$\frac{\partial F}{\partial \rho_i} = \frac{\partial F}{\partial \hat{u}_1} \frac{\partial \hat{u}_1}{\partial u_i} \frac{\partial u_i}{\partial \rho_i} \quad (19)$$

对于式(19)中的显式微分,有:

$$\frac{\partial F}{\partial \hat{u}_1} = - \frac{\lambda^2}{(\lambda + \hat{u}_1)^2} e^{-2u_1 H} \quad (20)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial \rho_i} = \frac{\partial u_i}{\partial \sigma_i} \frac{\partial \sigma_i}{\partial \rho_i} = \frac{-i\omega\mu}{2u_i \rho_i^2} \quad (21)$$

而

$$\frac{\partial \hat{u}_1}{\partial u_i} = \frac{\partial \hat{u}_1}{\partial u_2} \frac{\partial u_2}{\partial u_3} \dots \frac{\partial \hat{u}_{i-1}}{\partial u_i} \frac{\partial u_i}{\partial u_i} \quad (22)$$

根据式(4)、(5)有:

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial \hat{u}_{i+1}} = \frac{u_i^2 [1 - \tanh^2(u_i d_i)]}{[u_i + \hat{u}_{i+1} \tanh(u_i d_i)]^2} \quad (23)$$

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial u_i} = \frac{M}{[u_i + \hat{u}_{i+1} \tanh(u_i d_i)]^2} (i \neq N) \quad (24)$$

$$M = (u_i^2 + \hat{u}_{i+1}^2) \tanh(u_i d_i) + (d_i u_i \hat{u}_{i+1}^2 - u_i^3 d_i + 2u_i \hat{u}_{i+1}^2) \tanh^2(u_i d_i) + u_i^3 d_i - d_i u_i \hat{u}_{i+1}^2 \quad (25)$$

$$\frac{\partial \hat{u}_N}{\partial u_N} = 1 \quad (26)$$

将式(20)~(26)代入式(19)中,可得雅克比矩阵的解析解。由于在计算第 N 层的雅克比矩阵时,已遍历了最多的求导情况,只需将这些数据储存起来,并在前 $N-1$ 步调用。相比于数值差分法每次求解正演函数,此解析形式的计算可大大降低运算时间。

3 反演软件开发

瞬变电磁数据反演软件基于 Microsoft Visual Studio 2015 平台,使用开发语言 C++,能够完成读取数据、数据预处理、一维反演曲线展示以及保存结果等功能。该软件能对主流接收机的数据文件(.usf 格式)进行处理,具有较好的通用性。

3.1 数据读取

打开瞬变电磁数据文件,单击“显示”后显示不同发射线圈对应测点的相对位置,如图 1 所示。选中测点使其变为蓝色,单击“确定”跳转至预处理界面。

3.2 数据预处理

单击“原始数据”,显示原始数据曲线,如图 2 所示。瞬变电磁数据量级差别较大,为保证显示精度,在早期和中期将数据用对数表示,显示为黄色;晚期数据不做处理,显示为红色。图像左侧显示当前瞬变电磁系统参数,包括发射框中心点坐标、接收点坐标、发射电流、发射线圈匝数、发射线圈有效面积、飞行高度。由于目前直升机航空瞬变电磁系统正处于研制阶段,采用地面瞬变电磁系统的数据进行测试。

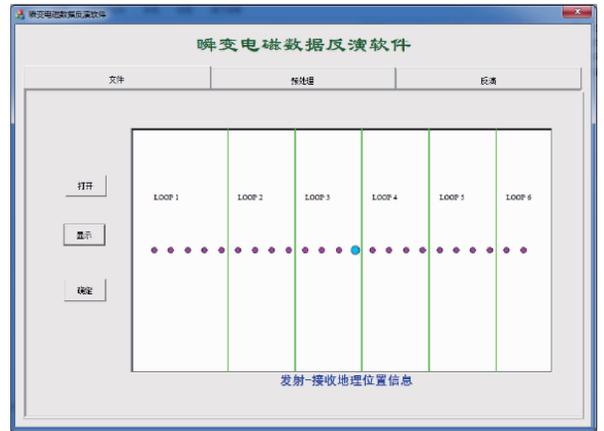


图 1 数据读取界面

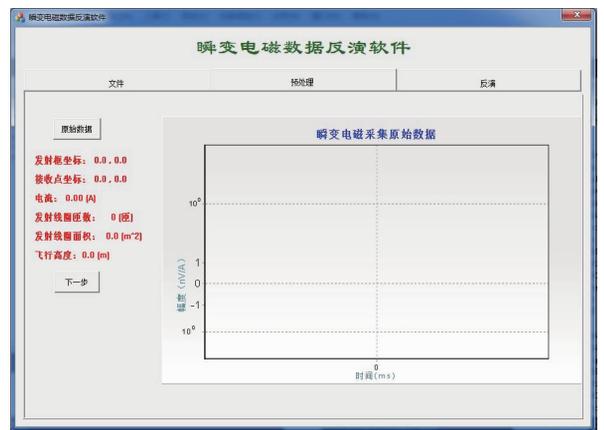


图 2 瞬变电磁原始数据

瞬变电磁的有效数据是衰减段,需剔除早期一次场部分和晚期噪声震荡部分。对数据点单击即可将数据从有效数据中趋势,如图 3 所示。

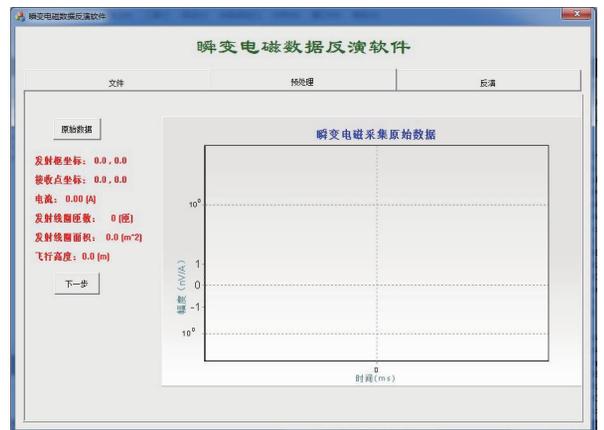


图 3 数据预处理

3.3 反演

按照 Occam 算法设置反演参数,包括反演层数、初始

厚度、厚度步长、初始均匀大地电阻率、最大迭代次数以及期望拟合差,单击“开始反演”按钮,开始反演,如图 4 所示。



图 4 数据反演

反演完毕后,单击“保存”按钮,选择路径保存反演数据。此时数据读取页面该测点变为白色,为不可选择状态,如图 5 所示。

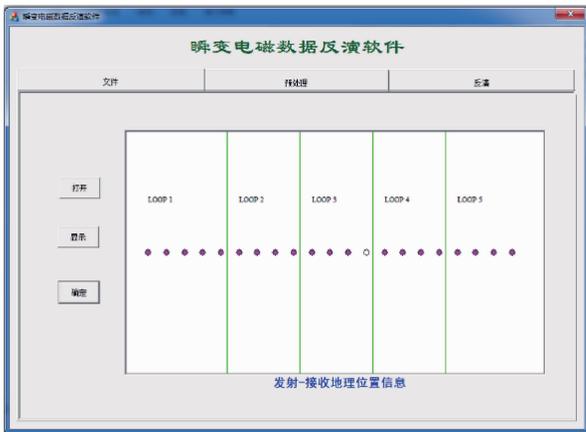


图 5 数据反演完毕后的读取界面

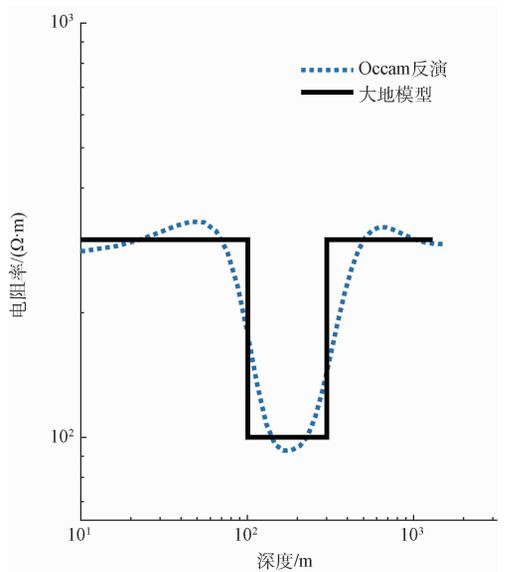


图 6 Occam 反演算例

4 实验

4.1 理论仿真

假设 3 层大地模型,从上至下电阻率分别为 300、100、300 $\Omega \cdot m$,每层厚度为 100、200 m,半空间,航空瞬变电磁系统发射线圈半径为 13 m,采用归一化发射电流,线圈匝数为 1,飞行高度为 30 m,接收线圈有效面积归一化。对该模型进行 Occam 反演,如图 6 所示。对反演得到的结果进行正演,响应与大地模型的响应重合,拟合良好,如图 7 所示。

4.2 实测数据反演

选用地面瞬变电磁系统测得的实测数据,将其用瞬变电磁数据反演软件反演,结果如图 8 所示。

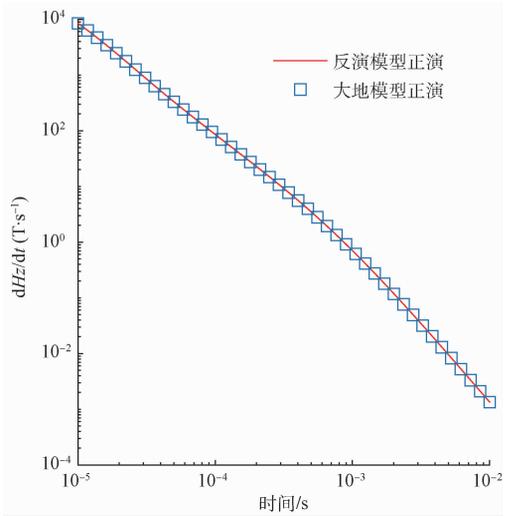


图 7 Occam 反演拟合曲线

根据本地的先验信息,该地区为含水量较多的均匀大

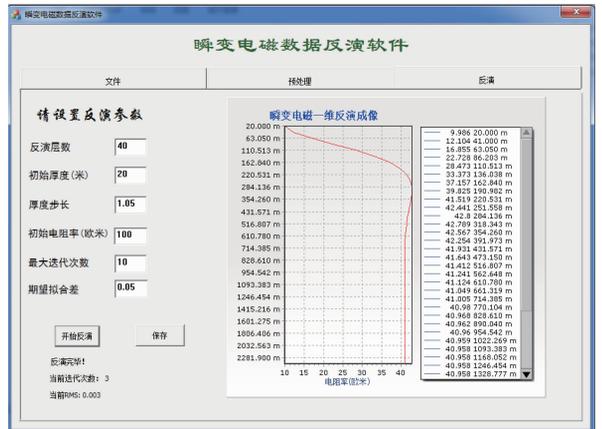


图 8 实测数据反演

地,电阻率总体呈低阻态。表层含水量高,故电阻率较低;深层含水量比表层少,故电阻率从上至下表现为由小变大的递增过程。当到达地下 200 m 左右时,电阻率呈现均匀变化趋势,此时表现出原始地电信息。

5 结 论

本文针对直升机航空瞬变电磁系统,对传统的一维 Occam 反演进行了研究。该算法相较于普通的最小二乘反演,具有迭代稳定、收敛迅速的特点,且不易陷入局部最小值。为了提高反演精度,加快迭代进程,本文具体推导了直升机航空瞬变电磁法的雅克比矩阵的解析解。在已有算法的基础上本文开发了一维瞬变电磁数据反演软件,该软件兼容主流接收机的数据文件,能对接收机储存的原始数据进行读取、预处理和反演,计算速度快,能适应野外数据快速解释的要求,弥补了国内航空瞬变电磁系统反演软件的空白,适合应用在工程实践中。

参考文献

- [1] 李建慧,朱自强,曾思红,等. 瞬变电磁法正演计算进展[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1393-1400.
- [2] 殷长春,黄威,贲放. 时间域航空电磁系统瞬变全时响应正演模拟[J]. 地球物理学报, 2013, 56(9): 3153-3162.
- [3] 张平松,刘盛东,李培根,等. 矿井瞬变电磁探测技术系统与应用[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(3): 1107-1114.
- [4] 武欣,薛国强,陈卫营,等. 瞬变电磁探测系统(CASTEM)试验对比——安徽颖上大王庄铁矿[J]. 地球物理学报, 2016, 59(12): 4448-4456.
- [5] 张涛,赵弘,王维斌,等. 基于响应面法的瞬变电磁法聚焦线圈优化设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(7): 28-32.
- [6] 柯丽,刘晶,杜强. 基于磁感应的水质电导率检测系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(2): 70-76.
- [7] 刘欢,董浩斌,葛健,等. 基于 Overhauser 效应的磁场梯度探测器[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 592-600.
- [8] 闫述,薛国强,陈明生. 大回线源瞬变电磁响应理论研究回顾及展望[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(3): 941-947.
- [9] 许洋铖,覃海明,吴燕清. 基于恒流源的矿用隔爆兼本安型瞬变电磁发射机研制[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12): 2696-2703.
- [10] 殷长春,张博,刘云鹤,等. 航空电磁勘查技术发展现状及展望[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2637-2653.
- [11] 罗勇. 时间域航空电磁一维正反演研究[D]. 成都:成都理工大学, 2013.
- [12] 李永兴,强健科,汤井田. 航空瞬变电磁法一维正反演研究[J]. 地球物理学报, 2010, 53(3): 751-759.
- [13] 罗清旺,师奕兵,王志刚,等. 铁磁性管道物理参数反演方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1): 9-14.
- [14] 强健科,李永兴,龙剑波. 航空瞬变电磁数据一维 Occam 反演[J]. 物探化探计算技术, 2013, 35(5): 501-505.
- [15] 闫岩,孙彩堂,周逢道,等. BP 神经网络曲线识别技术及在探雷上的应用[J]. 中国测试, 2016, 42(3): 90-93.
- [16] 谢宏,杨鹏,陈海滨,等. 遗传优化模糊 PID 融合算法的 5 自由度机械手控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1): 21-30.
- [17] 郭嵩巍. 中心回线瞬变电磁一维正反演算法研究[D]. 成都:成都理工大学, 2010.

作者简介

郭睿,1993 年出生,硕士研究生,主要研究方向为瞬变电磁正反演研究。

E-mail:greencs@163.com

武欣,1982 年出生,中国科学院电子学研究所副研究员,主要研究方向为瞬变电磁系统设计、信号处理以及正反演技术。

肖攀,1990 年出生,博士研究生,主要研究方向为瞬变电磁系统设计